



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**KONSTRUKČNÍ NÁVRH PRECIZNÍHO MANIPULÁTORU**

CONCEPTUAL DESIGN OF A PRECISION MANIPULATOR

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Petr Stuchlík**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jan Vetiška, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Bc. Petr Stuchlík**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vetiška, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Konstrukční návrh precizního manipulátoru

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konstrukční práce, jejíž cílem je konceptuální návrh precizního manipulátoru. Specifikem manipulátoru je jeho možnost použití v prostředí vakua.

### Cíle diplomové práce:

- rešerše dané problematiky
- návrh možných variant
- CAD model vybrané varianty
- výpočtová zpráva
- výkresová dokumentace vybraných dílů

### Seznam doporučené literatury:

HAJN, Miroslav. Základy jemné mechaniky a hodinářství: přehled přesné mechaniky v celém rozsahu s podrobným pojednáním o hodinářské technice. Praha: Práce, 1953.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. 3. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-802-6067-801.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá rozбором problematiky a následného konstrukčního řešení precizního manipulátoru využívaného jako stolek elektronového mikroskopu. První část závěrečné práce se zabývá problematikou, spojenou s pohybem zkušebního vzorku uvnitř elektronového mikroskopu. Následně byly navrženy možné konstrukční varianty, ze kterých se dále vyvíjely další kroky pro správnost a funkčnost manipulátoru. Jednotlivé silové namáhání součástí byly vypočítány. Výsledek práce byl zkonstruován jako CAD model s následným přenesením na výkres sestavy.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the problems of analysis and the subsequent design of a precision manipulator used as a microscope table. The first part of the final thesis deals with the problems associated with the movement of the test sample within the electron microscope. Subsequently, possible design variants were proposed, further developing the next steps for the correctness and functionality of manipulator. The individual force loads of the components were calculated. The result of the work was constructed as a CAD model with subsequent transfer to the assembly drawing.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Precizní manipulátor, elektronový mikroskop, vakuum, vibrace, magnetismus, tepelná dilatace.

## **KEYWORDS**

Precision manipulator, electron microscope, vacuum, vibration, magnetism, thermal dilatation.



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

STUHLÍK, P. *Konstrukční návrh precizního manipulátoru*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2018, 73 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vetiška, Ph.D.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Vetiškovi, Ph.D. nejen za naše konzultace, jeho rady, cenné připomínky, ale především za jeho věnovaný čas. Dále bych chtěl poděkovat svým blízkým za podporu nejen při psaní diplomové práce.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vetišky, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23.5.2018

.....

Stuchlík Petr



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>MOTIVACE.....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>	<b>17</b>
3.1	Elektronový mikroskop.....	17
3.2	Precizní manipulátor elektronového mikroskopu .....	18
3.3	Současný stav poznání precizního manipulátoru.....	18
3.3.1	Konstrukce.....	18
3.3.2	Vakuum .....	19
3.3.3	Elektromagnetismus .....	19
3.3.4	Pohybové členy.....	19
3.3.5	Pohon pojezdu .....	20
3.3.6	Osy a opce .....	20
3.3.7	Tepelná dilatace .....	21
3.3.8	Sdílení tepla .....	21
3.3.9	Vibrace.....	22
3.3.10	Vytvoření vakua .....	23
3.3.11	Magnetické vlastnosti .....	23
	Permeabilita .....	23
<b>4</b>	<b>MOŽNÉ VARIANTY ŘEŠENÍ .....</b>	<b>25</b>
4.1	Návrhové varianty řešení .....	25
4.2	Varianta A.....	26
4.3	Varianta B.....	27
4.4	Varianta C .....	28
4.5	Materiály konstrukce .....	29
4.5.1	Zlato.....	29
4.5.2	Měď .....	29
4.5.3	Hliník.....	29
4.6	Ložiska.....	30
4.6.1	Lineární ložiska .....	30
	Prizmatické vedení.....	30
	Valivá ložiska .....	30
4.6.2	Rotační ložiska .....	31
4.6.3	Elektrický pohon s jezdce.....	31
4.7	Motory soustavy .....	32
4.7.1	BLDC motor .....	32
4.7.2	Krokový motor .....	33
4.7.3	Piezoelektrický motor.....	33
4.8	Pohybový šroub s maticí.....	33
<b>5</b>	<b>VLASTNÍ VYPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>35</b>
5.1	Konstrukce .....	35
5.2	Materiál-dural .....	35
5.3	Ložiska.....	36
5.3.1	Lineární osa x, y, z – keramická válečková ložiska .....	36
5.3.2	Rotační opce b 90° – válečkové jednořadé.....	37
5.3.3	Rotační opce c 360° - kulíčkové jednořadé .....	37

5.3.4	Rotační osa z – kuličkové jednořadá.....	38
5.3.5	Rotační osa y – kuličková jednořadá.....	38
5.3.6	Rotační osa x – kuličková jednořadá.....	38
5.4	Pohon osy x, y, z, opce b – krokový motor .....	38
5.5	Pohon opce c – piezoelektrický motor .....	39
5.6	Pohybové šrouby a matice.....	40
5.7	Šnekové soukolí.....	41
5.8	Koncové spínače.....	41
5.9	Vyrovnání vedení pomocí bezhlavých šroubů .....	42
5.10	Odstínění motoru.....	42
5.11	Umístění motoru pod vedení osy x.....	43
5.11.1	Řemenový převod .....	43
5.11.2	Ozubený řemen polyuretan + povrchová úprava .....	44
5.12	Konstrukční detaily .....	44
5.13	Konstrukční řešení.....	46
<b>6</b>	<b>VÝPOČTY.....</b>	<b>48</b>
6.1	Tepelná roztažnost dural.....	48
6.2	Lineární vedení keramické .....	48
6.2.1	Osa x:.....	48
6.2.2	Osa y:.....	49
6.2.3	Osa z:.....	49
6.2.4	Jednotlivé parametry lineárního ložiska od firmy MN SYSTEMS .....	50
6.3	Ložiska .....	50
6.3.1	Ložisko opce b (90°) .....	50
6.3.2	Ložiska pohybového šroubu osy z .....	51
6.3.3	Ložisko pro osu y .....	52
6.4	Ložisko pro opci c 360°.....	53
6.5	Motory pro osu x, y a z + pohybový šroub.....	55
6.5.1	Výpočet motoru pro osu y: .....	56
6.5.2	Výpočet motoru pro osu x .....	57
6.5.3	Výpočet motoru pro osu z: .....	58
6.6	Motor opce b 90°.....	59
6.7	Motor opce c 360° .....	61
<b>7</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DISKUZE .....</b>	<b>62</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>69</b>
10.1	Seznam tabulek.....	69
10.2	Seznam obrázků.....	69
10.3	Seznam symbolů.....	70
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>73</b>
11.1	Výkresová dokumentace .....	73
11.2	CD.....	73

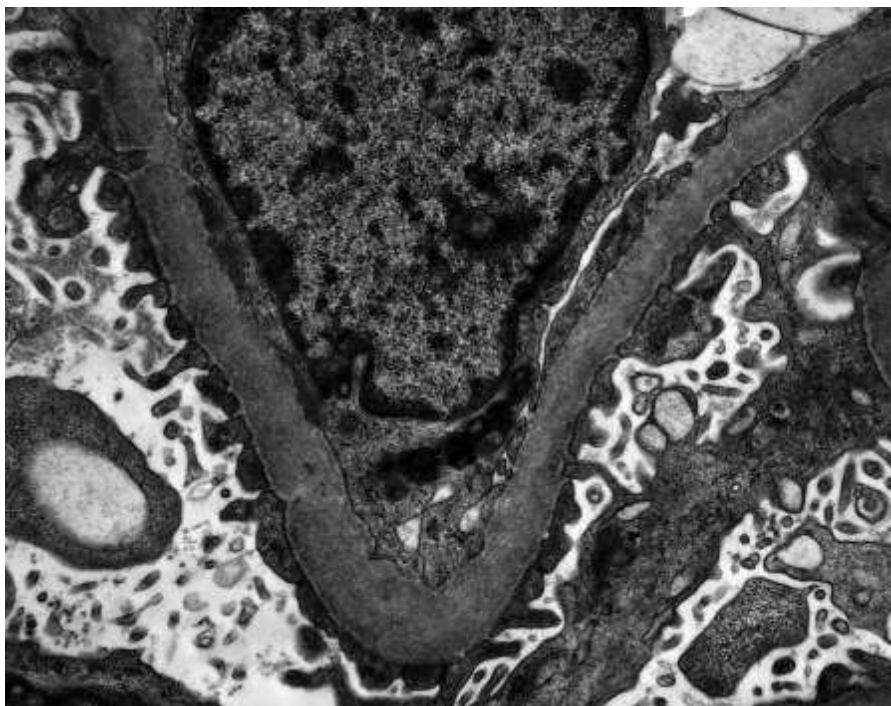
# 1 ÚVOD

V perfekcionistaické době, ve které se nyní svět pohybuje, je kladen důraz, jak na kvalitu materiálů v technickém oddělení, tak na zkoumání biologických objektů v lékařství. K tomuto úsilí dopomáhá elektronový mikroskop, jenž dokáže rozlišovací schopností poodkrýt tajemství atomů nebo virů.

Světelný (fotonový) mikroskop, který je vzhledem k jeho poměrně snadné konstrukci stále velmi žádaným zdrojem informací, má mnohem menší rozlišovací schopnost než elektronový mikroskop (až 1 000 000x). Proto elektronová mikroskopie zažívá doslova rozkvět. Rozlišovací schopnost je dána vlastní vlnovou délkou elektronu. Elektronové mikroskopy se dále dělí na dvě kategorie, tzv. TEM (transmisní elektronový mikroskop) a SEM (rastrovací elektronový mikroskop). Elektron, který prochází daným vzorkem musí být urychlován pomocí napětí. Urychlovací napětí elektronů souvisí s jeho vlnovou délkou, čím větší napětí, tím kratší vlnová délka. TEM využívá urychlovací napětí 100 - 400kV, kde výsledkem je rozlišovací schopnost 0,1nm. SEM využívá urychlovací schopnost 0,1 - 30kV, kde je výsledkem rozlišovací schopnost 1nm.

Elektronový mikroskop nemůže fungovat bez adekvátního manipulačního systému. Precizní manipulátor, na němž je uchycen zkoumaný vzorek, je důležitou součástí pro přesné a kvalitní měření. Precizní manipulátor (stolek) nesmí snižovat hodnotu rozlišovací schopnosti elektronového mikroskopu. Na stolku leží tedy nejen vzorek, ale také odpovědnost nad celým měřením.

Cílem diplomové práce je navrhnout funkční precizní manipulátor (stolek) pro elektronový mikroskop, který bude plně využitelný v praxi, nebo připraven k dalšímu zkoumání.



Obr. 1) Detail zvětšení materiálu [1]

## 2 MOTIVACE

Světový pokrok nelze zastavit. Nikoho z nás nepřekvapí, že nové mechanismy, metody nebo objevy jsou prakticky na denním pořádku. V dnešní době, kdy jsou téměř vyčerpány hmatatelné tajemství, je přesouvána pozornost na mikroskopické taje tohoto světa.

Pro odhalení tajemství mikrostruktur, které na nás čeká v nanometrických rozměrech, dopomáhá elektronový mikroskop. Tento druh mikroskopu byl vyvíjen v letech 1928-1933. Otcem elektronového mikroskopu je Ernst Ruska, který byl v roce 1986 odměněn Nobelovu cenu za zásadní práci v elektronové mikroskopii a prvním návrhem elektronového mikroskopu. Rozkvět elektronové mikroskopie však započal až díky moderní technice.

Elektronová mikroskopie je tedy metoda umožňující studium mikrostruktur zkoumaných objektů. Jeho rozlišovací schopnost dovoluje vidět tvar, velikost a také druh atomu. Možnost vidět vzorky tak malých rozměrů, rozšiřuje vědění v mnoha odvětví napříč všemi obory. Pozorování virů, popřípadě jiných škodlivých buněk pomáhá vědcům při tvorbě vakcín a léků. Naopak vědnímu oboru metalurgie pomáhá elektronový mikroskop při tvorbě slitin. Žádný materiál není dokonalý, jednotlivé příměsi zhoršují kvalitu slitiny. Pozorování jednotlivých atomů materiálu slouží ke zdokonalení čistých kovů, popřípadě slitin.



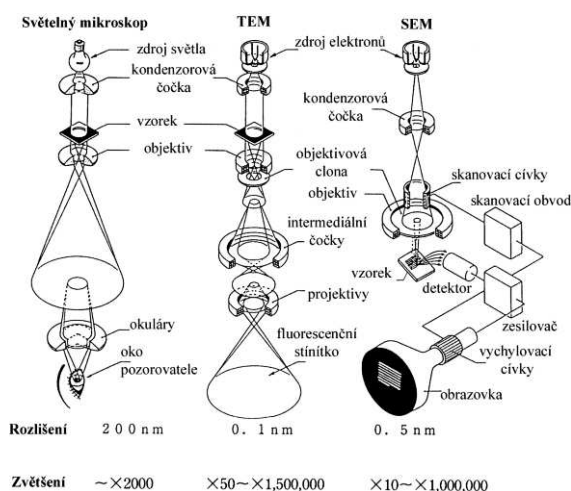
## 3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 3.1 Elektronový mikroskop

Mechanismus umožňující pozorovat předměty, které jsou pouhým lidským okem neviditelné. Elektronový mikroskop, jak již název napovídá, využívá svazek elektronů fokusovaný pomocí magnetů pro zvětšení a rozlišení zkoumaného vzorku. Jak již bylo řečeno, elektronový mikroskop dělíme na dva druhy TEM (transmisní elektronový mikroskop) a SEM (rastrovací elektronový mikroskop). U TEM je viditelný obraz vytvořen na fluorescenčním stínítku svazkem elektronů, které prošly studovaným vzorkem, nebo které ve vzorku difraktovaly. SEM pracuje tak, že na vzorek dopadá tenký svazek elektronů, který dopadá postupně na všechna místa vzorku. Odražený (eliminovaný) paprsek se převádí na viditelný obraz. Pro lepší představu o principu a funkci TEM a SEM poslouží obr. 2.

Bezpochyby největší výhodou elektronových mikroskopů je jejich velmi velké zvětšení objektů – řádově až 1 000 000x, což umožňuje pozorovat i opravdu malé částice. Větší rozlišovací schopnosti dosahuje TEM, který však potřebuje pro měření velmi tenký zkoumaný vzorek (10 – 500nm), což můžeme pokládat za nevýhodu při jeho výrobě. Dále elektronové mikroskopy využívají pro pohyb elektronů vakuum, to zabraňuje pozorování živých organismů. (Při upravení preparátu lze zkoumat i živé organismy, například zmražením vzorku). Sílu svazku elektronů a pohybu vzorku, lze řídit pomocí počítače, což umožňuje veškerý komfort, který tato technika poskytuje (zobrazování výřezů, odstranění šumu, snížení rastrovací rychlosti, a jiné). Nevýhodou elektronových mikroskopů je jejich vysoká pořizovací cena, taktéž požadavky na prostor, čistotu a umístění na vlastní základy.

Jak již bylo nakousnuto, rozlišovací schopnost záleží na vlnové délce elektronu. Z matematických vztahů taktéž vyplývá, že volbou vyšších urychlovacích napětí dosáhneme kratší vlnové délky a tím i větší hodnotu rozlišovací meze. Tento způsob vedl dříve ke konstrukci mikroskopů enormně velkých konstrukcí, pro něž musely být postaveny speciální budovy – délka tubusu totiž dosahovala i přes 2 patra budovy. V dnešní době přicházejí vědci se stále dokonaleji korigovanými vadami elektromagnetických čoček, které umožní dosáhnout lepších rozlišení při zachování běžné velikosti mikroskopu. [2] [3] [4]

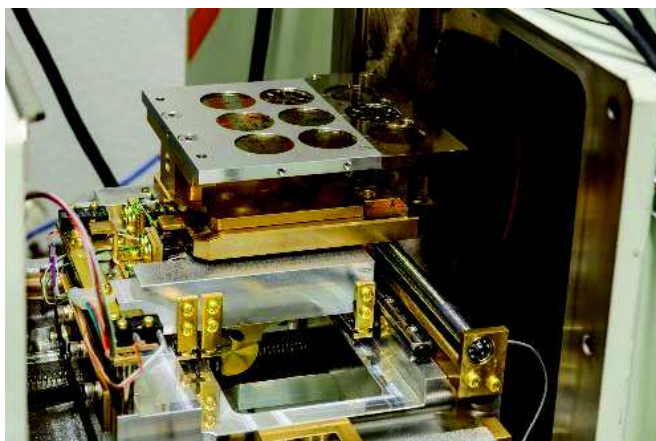


Obr. 2) Princip funkce TEM a SEM [3]

### 3.2 Precizní manipulátor elektronového mikroskopu

Samotný stolek (precizní manipulátor), umístěný v dokonale izolované vakuové komoře elektronového mikroskopu. Slouží k umístění, a následného pohybu vzorku do požadované polohy. Elektronový mikroskop kladě velký důraz na preciznost a spolehlivost stolku při jeho pohybu se vzorkem. Celá koncepce stolku vychází z mnoha letého bádání a následných pokusů. Velké firmy pracují neustále na zdokonalení svých projektů, pro co největší možnou přesnost pohybu stolku a tím rozlišovací schopnost elektronového mikroskopu.

Stolek se v mnoha ohledech liší pro použití v TEM nebo SEM. Jak již bylo zmíněno, TEM pracuje s tenkým vzorkem zkoumaného materiálu, zatím co SEM nepotřebuje takové privilegium. To zapříčiní faktory jako únosnost a vhodný materiál stolku pod samotným zkušebním vzorkem, místo pro detektor (mechanismus pro pohlčení a následné vyobrazení elektronů u SEM), a jiné. Kdežto společnými faktory jsou například, materiál celé konstrukce, důraz na minimalizaci soustavy, práce ve vakuu, možnost co nejvyššího počtu pohybu a natočení vzorku, přesnost, a jiné. [3]



Obr. 3) Stolek elektronového mikroskopu [5]

### 3.3 Současný stav poznání precizního manipulátoru

Stolek elektronového mikroskopu je řešen samostatnou skupinou konstruktérů, kteří však úzce spolupracují s vývojovým centrem elektronových mikroskopů. S nadsázkou lze říci, že je stolek nejdůležitějším prvkem elektronového mikroskopu pro přesnost měření.

#### 3.3.1 Konstrukce

Hlavní problém základní konstrukce (rámu), je bezpochyby velikost vakuové komory, ve kterém se stolek nachází. Stísněné podmínky svazují konstruktérovy ruce při návrhu možného koncepčního řešení. Při návrhu je kladen velký důraz na minimalizování konstrukce, tím spojené jsou další nepříjemné vlivy jako odvod tepla, dostatečný pohyb vzorku, snížení únosnosti, magnetismus, druh pohybových částí a pohonu.

Prioritou každé konstrukce je využít co nejvíce stupňů volnosti pro zkušební vzorek. Firmy své produkty chrání, před kopírováním a plagiátorstvím. Proto je velmi obtížné sbírat podklady ke zpracování možného koncepčního řešení. Pohyb os x, y, z, s možnou opcí c a b, znamenají jakousi sounáležitost se stolkem pro CNC obráběcí centra.

Protože se konstrukce stolku bude pohybovat uvnitř vakuové komory, musí se zajistit odvod vzduchu ze všech částí stroje. To znamená, nesmí v konstrukci zůstat dutá místa. Vzduch

při interakci s proudem elektronů nejen poškodí měřený vzorek, ale přítomnost  $H_2O$  může poškodit elektronovou trysku nebo jiné důležité komponenty mikroskopu

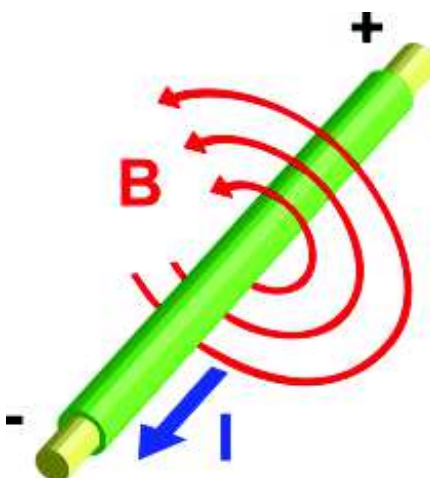
### 3.3.2 Vakuum

Vakuum česky též vzduchoprázdno znamená prázdný prostor. V technické praxi se jím však rozumí prostor, v němž je tlak plynu podstatně menší než při normálním atmosférickém tlaku ( $p_n = 101325 \text{ Pa}$ ). Škála kvality vakua má velmi rozmanité technické využití ve vakuové technice.

Označení vakuum je fyzikální stav, v němž není přítomná částice jak hmoty (elektron, proton), tak ani záření (fotony). Jedná se tedy o část prostoru, která neobsahuje hmotu. Podle kvantové teorie však ani prostor bez jakékoliv hmoty není docela prázdný, ale probíhá zde mnoho procesů (kvantově-mechanické fluktuace, tvorba párů částic a antičástic). [6][7]

### 3.3.3 Elektromagnetismus

V klasickém elektromagnetismu (vakuum prázdného prostoru) je standartní vztažné prostředí pro elektromagnetické účinky. Tyto účinky jsou potřebné pro ohýbání dráhy elektronu. Kvalita vakua se dělí na pásma (skupiny) podle tlaku. Pro elektronové mikroskopy jsou používány vakua vysoká (HV) a ultravysoká (UHV). Jejich tlak dosahuje od  $10^{-5}$  do  $10^{-7} \text{ Pa}$ . Takový tlak zapříčiní velké nároky na pevnost a tuhost konstrukce komory, a taktéž dostatečné utěsnění jednotlivých komponent. Na obr. 4 je zobrazen pohyb elektronů od kladného k zápornému pólu, který vytváří magnetický indukční tok a jeho směr. [6] [8]



Obr. 4) Indukce tvořená procházejícími elektrony [8]

### 3.3.4 Pohybové členy

Jednotlivé komponenty, které umožňují pohyb (pohybový šroub, lineární vedení, a jiné) vzorku v požadovaných osách, musí spolehlivě pracovat ve vakuu. Na trhnu se vyskytuje dostatečné množství typů těchto komponent. Pohybové členy musí pracovat bez možnosti mazání s co nejmenším vznikem otěru. I nepatrná částice prachu, nebo štěpu od pohybových zařízení, může znehodnotit výsledek měření. Dbá se na velmi čisté prostředí bez vnějších zásahů. Dále je zde také možnost narušení dráhy elektronů od magnetických vlastností použitého materiálu.

### 3.3.5 Pohon pojezdu

Pro přeměnu výchozí energie na energii mechanickou, slouží nejčastěji elektromotor, který svým kroutícím momentem udává do pohybu matici pohybového šroubu. Pohon nemusí být z pravidla umístěn u jednotlivých pohybových částí, dokonce se objevuje i mimo vakuum, tedy vně komory. Motory, jež neleží na pohybové ose šroubu, pro svůj přenos energie využívají hřídelové klouby. Tohle řešení má několik výhod, jako jsou odlehčení váhy konstrukce, volba druhu motoru, kde nezáleží na fyzikálním stavu vakua, minimalizace stolku a odvod tepla. Nevýhodou je však náročnost konstrukčního zpracování a sním spojené ztráty (skluz) ve vedení. Obecně platí pravidlo, čím méně spojovacích členů, tím větší účinnost. Elektronový mikroskop potřebuje přesné polohování s co nejpresnější opakovatelností. Uvnitř komory jsou použity speciální motory pro hladký chod ve vakuu. Jak již bylo uvedeno, vakuum rozdělujeme do několika pásem. Zvolený motor musí bezpečně překonat daný podtlak, tím se vyhnout případnému znemožnění správnosti funkce. Dále motor nesmí produkovat odpad v jakékoli formě (kouř, jiskření). Speciální motory mají také dostatečný odvod tepla. U některých typů mikroskopů je magnetická čočka vně komory. To způsobuje problém s motorem, který obsahuje magnety, kvůli možnému narušení trajektorie proudu elektronů.

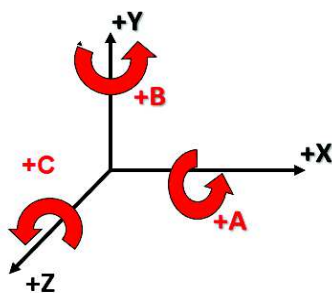
Pro přeměnu energie může být také použit například pneumatický motor, který sice nedosahuje takového krouticího momentu, ale za to odstraňuje veškerý problém s magnetizací a otěrem.



Obr. 5) Mezičlen, kloubová hřídel [9]

### 3.3.6 Osy a opce

Pohyb zkušební vzorku v ose x a y slouží pro správné nastavení polohy pro měření elektronového mikroskopu. Proud elektronů procházející elektronovou čočkou, který dále dopadá na preparát, nesmí být rozostřen. K tomuto slouží pohyb v ose z, kde zkušební vzorek (preparát), lze dostatečně zaostřit pro dokonalý výsledný obraz. Naklopení opce b ( $90^\circ$ ) umožňuje pootočení skenovaného vzorku. Elektronový mikroskop je počítačově řízený stroj, který dokáže sestavit 3D obraz skenovaného vzorku (tomografie). Rotace osy z není nutná pro samotné zobrazování, avšak pro tomografii a následnou práci s lamelkami je přímo nezbytná (opce c  $360^\circ$ )



Obr. 6) Schéma souřadného systému [10]

### 3.3.7 Teplotní dilatace

Motor konající mechanickou práci, vylučuje mimo jiné teplo. Teplo z motoru napomáhá k tepelné dilataci materiálu. Komora musí obsahovat dostatečný odvod tepla z používaných motorů, aby předešlo těmto nechtěným jevům. Speciální motory redukovávají vylučování tepla na minimum. Dalším indikátorem tepla je proud elektronů proudící přes vakuum (sálání tepla) na zkoumaný vzorek. Také pohybové části (pohybový šroub s maticí, ložisko, vedení) způsobují vznik tepla třením, který zahřívá okolní materiál a tím celý manipulátor. Teplota uvnitř vakuové komory je slučitelná s okolní teplotou. Identická teplota uvnitř i vně elektronového mikroskopu má zásadní vliv na tepelnou dilataci. Při výměně vzorku, nebo při seřizování manipulátoru, by mohlo dojít k tepelné dilataci, kdyby teplota okolí byla jiná. Proto se dbá na stálost teploty v celé místnosti. Vyvíjeným teplem a sním spojenou tepelnou dilatací se počítá, proto je ustavena vždy horní hranice možné tepelné dilatace (například posun obrazu 20nm/min).

Celá místnost, kde bude mikroskop ustaven je plně klimatizována. Elektronový mikroskop je tak náchylný na změnu teploty, že se nesmí v dané místnosti pohybovat více osob najednou kvůli teplu, které vyzařují z těla. Dokonce i v době kdy neprobíhá měření, má daná místnost omezenou kapacitu počtu osob, tak aby nedocházelo k rozpínání materiálu. Celý tubus i komora elektronového mikroskopu je propletena mnoha teplotními senzory, které dbají na správnou vyváženost teploty celého mikroskopu. Jednotlivé části mohou být více či méně tepelně zatěžovány, chlazení se musí těmto změnám přizpůsobit. [11]

### 3.3.8 Sdílení tepla

Předávání tepla (přenos tepla) může probíhat třemi základními způsoby: vedením, prouděním a sáláním. Tepelné vlastnosti ovlivňují strukturní vlastnosti materiálů a často mění základní mechanické a deformační vlastnosti (elasticita, pevnost, deformace a jiné). Tepelnou vodivost vybraných materiálů poskytuje pro ukázkou tab. 1.

Tab 1) Hodnoty tepelné vodivosti vybraných materiálů [13]

Materiál	Tepelná vodivost (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
stříbro	418
měď	395
hliník	229
železo	73
žula	2,9 – 4,0
led	2,2
beton	1,5
voda	1,0
cihla	0,28 – 1,2
sklo	0,6 – 1,0
linoleum	0,19
polystyren	0,16
benzín	0,131
skelná vata	0,04
vzduch	0,024

Sdílení tepla vedením nastává předáváním kinetické energie mezi molekulami a elektrony vlivem teplotních rozdílů. Vedení tepla je tedy molekulárním mechanismem sdílení tepla. Tam kde molekuly nebo elektrony mají vyšší kinetickou energii (teplotu), předávají svou energii na molekuly nebo elektrony s nižší kinetickou energií. Závisí na vlastnostech prostředí



a na jejich vzájemné vzdálenosti. Vedení tepla se týká látek pevných kapalných i plynných. Při snižování tlaku se molekuly (elektrony) vzdalují, tím roste odpor proti vedení tepla. Snižování tlaku se využívá pro tepelné izolace, naopak volné (vysoce pohyblivé) molekuly jsou u kovových materiálů (využití pro vedení el. proudu nebo tepla). Jak už bylo řečeno, komora elektronového mikroskopu používá vysoké pásmo vakua (až  $10^{-7}$  Pa). Sdílením tepla vedením tedy hrozí v případě pevných materiálů použitých pro konstrukci, popřípadě pohony.

Ke sdílení tepla sáláním (neboli zářením; radiací) dochází mezi dvěma tělesy tak, že se z jednoho tělesa energie ve formě elektromagnetického vlnění přenáší na druhé těleso. K takovému procesu výměny tepla (radiální energie) mezi dvěma tělesy musí být mezi tělesy prostředí propouštěcí záření. Takové prostředí se nazývá transparentní. Vakuum v komoře nikdy nebude dokonalým vakuem, což umožní sdílení tepla sáláním mezi dvěma tělesy.

**Poznámka:** Jak bude uvedeno níže, dokonalé vakuum nelze vytvořit za použití vývěvů, vždy zůstávají molekuly plynu uvnitř komory (nečistoty). Sdílení tepla sáláním tedy je možné, ale velmi malé.

Sdílení tepla prouděním znamená proudění tepla v pohyblivém prostředí (především v tekutinách). Pro elektronový mikroskop toto vedení tepla nepředstavuje žádné ohrožení

Z tab. 1 zle vyčíst součinitel tepelné vodivosti jednotlivých prvků. Tepelná vodivost představuje schopnost daného kusu látky (konstrukce) vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí. [12] [13]

### 3.3.9 Vibrace

Každý miniaturní záchvěv manipulátoru způsobí rozostření záběru. Zachycení vibrací a chvění stroje je jednou z nejdůležitějších opatření pro přesné měření. Pohybové šrouby s maticemi přenášející kroutící moment z motoru, musí vynikat malým statickým třecím momentem a pomalým chodem, bez zbytečných prudkých změn pohybu. Vibrace jsou způsobeny taktéž vysokou hladinou hluku. Pro elektronový mikroskop je tato hranice posunuta na velmi nízkou úroveň, kdy opravdu stačí pouhý lidský hlas k rozvibrování čoček uvnitř mikroskopu.

Hlavním indikátorem vibrací zůstává však elektromotor, ten při přeměně energie přenáší vibrace na konstrukci stolku. Motor je také zdrojem tepla. S rostoucí teplotou bude motor produkovat více vibrací, které ložiska uvnitř motoru nedokážou usměrnit. Elektromotory musí mít kvalitní řízení pro co možná nejmenší generaci vibrací.

K odstranění vibrací v různých strojních odvětvích, bývají často využity materiály, které pohlcují mechanické chvění (pryž, korek, guma a jiné). Tyto materiály jsou však vyplněny vzduchem (až 95 % z celkového objemu – nemožnost použití ve vakuu). Aby materiál dobře absorboval chvění, musí být póry navzájem spojeny. Tyto materiály nejsou vhodné pro použití u konstrukce mikroskopového stolku, a to z mnoha důvodů jako jsou (ztráta pevnosti a tuhosti, tepelná vodivost, hořlavost a jiné). Pro absorbování vibrací výrazně pomohou konstrukční úpravy tvaru součástí. Jedná se o využití materiálu, který sám o sobě netlumí dostatečně vibrace tím, že upravíme konstrukci do tvaru, který zvětší tlumící účinky.

Celý elektronový mikroskop je ustaven na samostatném základu s pružinami. Při procesu měření mikroskopu nesmí být nikdo v bezprostřední blízkosti mechanismu. Seběmenší záchvěv naruší měření, jak již bylo napsáno výše, pouhý hlas člověka může kvůli vlnové délce a rezonanci narušit proces měření. [14] [15]

### 3.3.10 Vytvoření vakua

Vnitřní prostor komory mikroskopu, ve kterém se pohybují elektrony, musí být vakuovaný. Základní důvody tohoto požadavku jsou tyto:

1. Elektronová tryska musí být izolována vakuem, protože vzduch není dostatečně dobrým izolantem. Vzniká nebezpečí ionizace vzduchu a následného elektrického výboje mezi katodou a anodou trysky.

2. Vzduch obsahuje molekuly  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ , a uhlovodíky, které způsobují kontaminaci tubusu i pozorovaného předmětu (zkušební vzorku).

Vytvoření pracovního vakua v rozmezí  $10^{-5}$  až  $10^{-7}$  Pa, jsou zaručena pomocí vývěvů. Používají se především kombinace rotačních (snižuje tlak zhruba na  $10^{-1}$  Pa) a difúzních (zhruba na  $10^{-3}$  Pa), iontových a turbomolekulárních vývěvů. Prostor elektronové trysky vyžaduje nejvyšší stupeň vakua až  $10^{-7}$  Pa (přibližně stejný tlak je v kosmickém prostoru), kterého je dosahováno pomocí iontových vývěvů.

Za nutnost je zmínit také turbomolekulární vývěvu. Kdy i přes vysoký podtlak (stupeň vakua), dochází ke kontaminaci vnitřku tubusu zbytky vodních par (z těsnících tuků). Proto se používá tato speciální vývěva pro odstranění všech vad ovlivňujících kvalitu obrazu [6].

Tab 2) Přehled druhů vakua [6]

Pásmo (označení vakua)	Tlak v mbar (hPa)	Počet molekul na $cm^3$	Střední volná dráha částice
Atmosférický tlak	1013,25	$2,7 \cdot 10^{19}$	68 nm
Hrubé vakuum	300 až 1	$10^{19}$ až $10^{16}$	0,1 až 100 $\mu m$
Jemné vakuum	1 až $10^{-3}$	$10^{16}$ až $10^{13}$	0,1 až 100 mm
Vysoké vakuum (HV)	$10^{-3}$ až $10^{-7}$	$10^{13}$ až $10^9$	100 mm až 1 km
Ultravysoké vakuum (UHV)	$10^{-7}$ až $10^{-12}$	$10^9$ až $10^4$	1 až $10^5$ km
Extrémně vysoké vakuum (XHV)	$<10^{-12}$	$<10^4$	$>10^5$ km

### 3.3.11 Magnetické vlastnosti

Magnetické vlastnosti se dělí do třech základních skupin podle velikosti relativní permeability.

#### Permeabilita

Permeabilita je fyzikální vlastnost, která vyjadřuje vliv určitého materiálu nebo prostředí na výsledné účinky působícího magnetického pole. Některá prostředí tyto účinky zesilují, jiná je zeslabují a existují také prostředí bez tohoto vlivu.

#### Relativní permeabilita $\mu_r$

Relativní permeabilitou se označuje podíl permeability daného materiálu a permeability vakua. Je to bezrozměrná veličina. Většina látek je velmi blízko hodnoty 1, což odpovídá slabé reakci na magnetické pole. Látky, které mají  $\mu_r > 1$  se nazývají paramagnetické, feromagnetické. Tyto látky jsou do magnetického pole vtahovány. Naopak látky, které mají  $\mu_r < 1$ , se nazývají diamagnetické a jsou z magnetického pole vypuzovány.

Magnetické vlastnosti jsou způsobeny pohybem elektronů v atomech, čím kolem sebe vytvářejí magnetické pole. Tato elementární magnetická pole se skládají a určují výsledné magnetické pole atomů a tím vlastnosti látky.

### **Diamagnetické látky**

Elementární magnetická pole se zcela ruší, látky zeslabují magnetické pole, do kterého jsou vloženy (jsou z něho slabě vytlačovány).

### **Paramagnetické látky**

Elementární magnetická pole se ruší jen částečně, látky zesilují magnetické pole, do kterého jsou vloženy (jsou do něho slabě vtahovány) Vnější magnetickým polem nelze atomy uspořádat tak, aby látka více zesilovala magnetické pole. Tomu brání tepelný pohyb atomů.

### **Feromagnetické látky**

Mají stejné atomy jako paramagnetické látky, ale ty jsou uspořádány do malých domén, které jsou souhlasně zmagnetovány. Látky značně zesilují magnetické pole, do kterého jsou vloženy (jsou do něho silně vtahovány). [16] [17]



## 4 MOŽNÉ VARIANTY ŘEŠENÍ

Možné konstrukční řešení precizního manipulátoru vycházejí z vědeckých prací, odborných článků, prezentací, především však osobním kontaktem. Jednotlivé vakuové komory se liší velikostí komory a přístupem operátora k pracovní desce stolu. V dnešní době pohyb preparátu obstará výkonný procesor, který ovládá jednotlivé osy a opce stolku. Proto se musí dbát také na vhodné umístění přívodní kabeláže, aby nedošlo k porušení stolu, motorů nebo popřípadě čočky elektronového mikroskopu. Dalšími důležitými informacemi pro tvorbu manipulátoru jsou rozměr pracovní desky, pracovní vakuum, umístění motorů, druh elektronu (SEM, TEM)



Obr. 7) Manipulátor s tryskou elektronového mikroskopu [19]

### 4.1 Návrhové varianty řešení

Všechny konstrukční varianty řešení dbají na možnost pracovního rozsahu v osách x, y, z (100 mm; 100 mm; 40 mm) s možnou opcí c (360°) a opcí b (90°). Dále bylo předem stanoveno umístění motorů, co možno nejblíže k pohybovým zařízením, tzn. motor spojen s pohybovým mechanismem, bez spojovacích členů jako jsou hřídelové klouby a ozubených řemenů. Varianty A, B, C splňují požadavek rozebíratelnosti jednotlivých částí, především pohybových zařízení. Navrhnuty jsou tak, aby co nejvíce zamezovali přenosu vibrací a tepla. Všechny varianty budou mít dostatečný přístup k výstupní desce stolu, na němž je umístěn preparát.

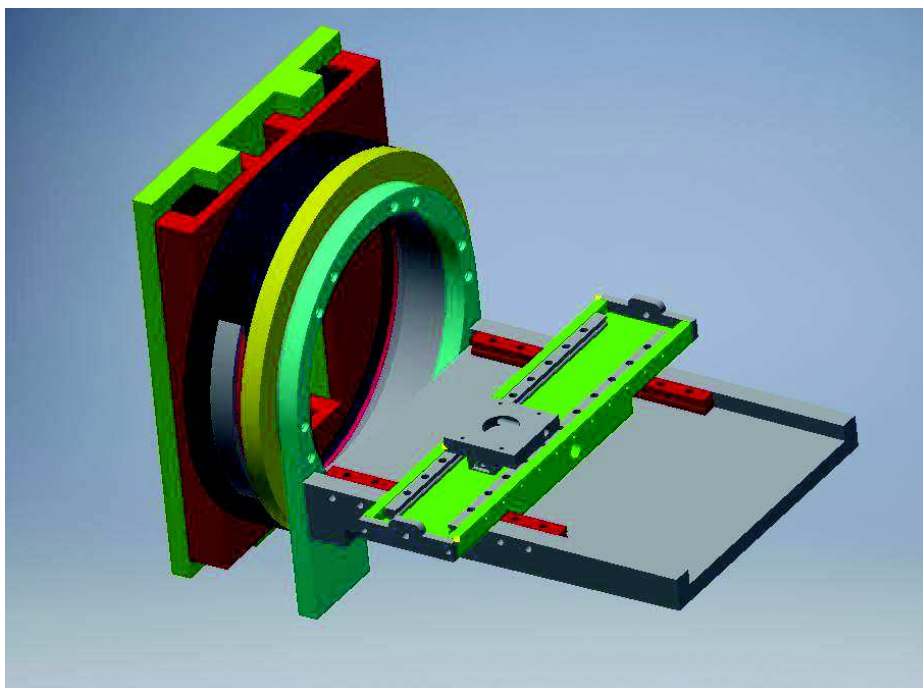
Ukázkové varianty konstrukce slouží pouze k posouzení a vyhledání nejvhodnější varianty řešení. Ze které následně bude konstrukce vycházet.

## 4.2 Varianta A

Základna konstrukčního řešení varianty A bude umístěna na boční stěně vakuové komory. Primární pohyb (pomocí pohybového šroubu a matice), zaručuje pohyb ve směru osy z. Jako další pohyb v pořadí od základní desky bude naklopení soustavy o  $90^\circ$ . Stupeň volnosti zajišťuje rotační ložisko umístěné uvnitř konstrukce. Pootočení soustavy vykoná šnekové soukolí. Dalšími možnostmi pohybu budou posuvy v ose x a y. Oba pohyby bude vykonávat pohybový šroub a matice. Podstatným prvkem celé soustavy bude také možnost natočení vzorku okolo osy z (opce c  $360^\circ$ ).

Celá konstrukce bude propojena s řídicím systémem včetně s odměřováním polohy. Motory budou umístěny u pojezdu každé osy.

Konstrukce bude mít poměrně malé rozměry, což je kvůli velikosti vakuové komory podstatným faktorem. Největším problémem bude radiální síla na ložisku, kdy zkušební vzorek dosáhne polohy nejdelší možné úhlopříčky od základní desky. Základní deska i ložisko bude tedy zatížena podstatným momentem síly. To může vést k průhybu stolu a tím nepřesného měření, popřípadě k narušení pevnosti materiálu.



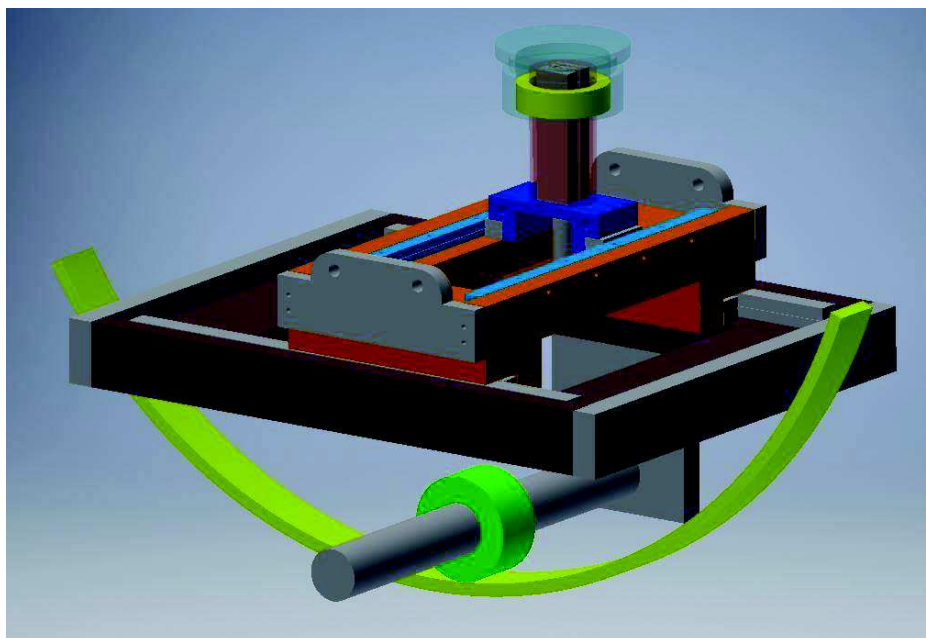
Obr. 8) Konstrukční varianta A

### 4.3 Varianta B

Konstrukce varianty B vychází z podstaty kolébky. Základní deska stolu koná naklápěcí pohyb (Opce b 90°), pomocí vnitřního čelního soukolí. Pohyb osy x a y vykonává pohybový šroub s maticí, podobně jako u varianty A. K nejkomplikovanějším prvkům soustavy bezpochyby patří otočný stůl (opce c 360°) s možností vysunutí v ose z. Motor pro posuv osy z je umístěn ve vnitřní části stolu. Pomocí pohybového šroubu bude mít stůl v ose z možnost posuvu. Na vnější straně bude umístěno šnekové soukolí pro možnou opci c 360°.

Celá konstrukce bude taktéž propojena s řídicím systémem včetně odměřování polohy. Motory budou umístěny u pojezdu každé osy.

Tato konstrukce vyniká pro svou tuhost a pevnost, díky masivnímu základnímu stolu. Velkou nevýhodou jsou však rozměry návrhu soustavy. Rozměry konstrukce v ose z, zapříčiní nemožnost použití stolu pro transmisní elektronové mikroskopy (TEM). TEM kvůli průchodu elektronů zkušebním vzorkem, promítá nejprve první obraz procházejícím projektorem, poté výsledný obraz na stínítko pod manipulátorem.



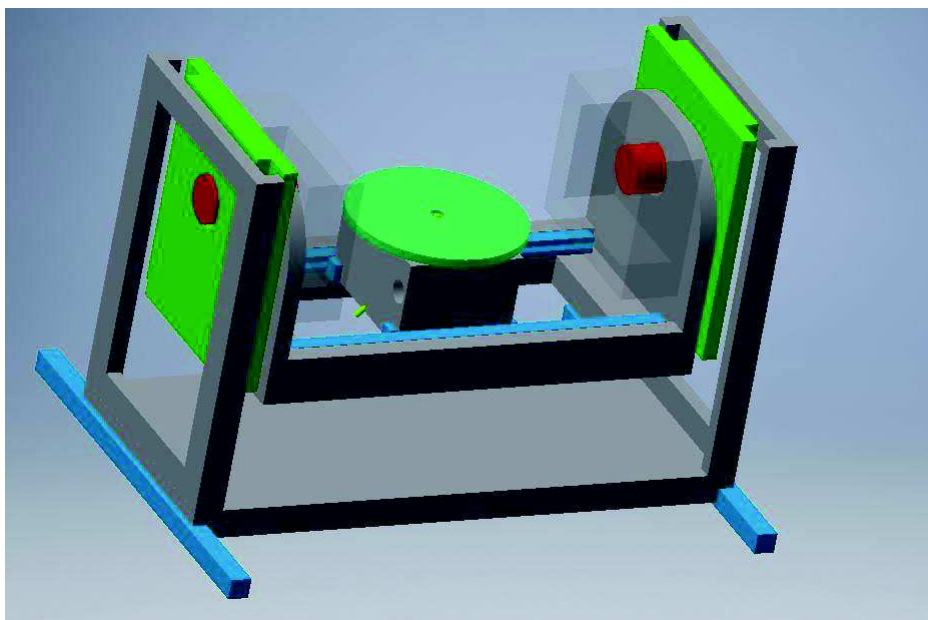
Obr. 9) Konstrukční varianta B

#### 4.4 Varianta C

Varianta C vychází z koncepčního návrhu CNC obráběcího centra. Primární osa x tvoří základní desku, která pomocí pohybové šrouby, popřípadě lineárních motorů umožní pohyb v dané ose. Na boční konstrukci pohybové základní desky bude umístěn pohybový šroub s možností pohybu v ose z. Opci b  $90^\circ$ , obstará šnekové soukolí umístěno na vnitřní straně mechanismu. Dále zde bude pohyb v ose y díky pohybovému šroubu. Na konec otočná deska s opcí c  $360^\circ$ , kde bude elektromotor umístěn uvnitř stolku.

Celá konstrukce bude taktéž propojena s řídicím systémem včetně odměřování polohy. Motory budou umístěny u pojezdu každé osy.

Varianta konstrukce C zaručuje tuhost a pevnost konstrukce. Kvůli šnekovému soukolí uvnitř (blíže ke zkoumanému vzorku) konstrukce, musí být zvětšeny rozměry. Dále zde bude určitá náročnost umístění všech pohybujících se komponentů a neodpovídající přístup k preparátu. Výchozí parametry snadná konstrukce a minimalizace rozměrů, zde nejsou zastoupeny.



Obr. 10) Konstrukční varianta C

## 4.5 Materiály konstrukce

Materiály konstrukce precizního manipulátoru podléhá důkladné analýze jednotlivých vlastností materiálů. Základní vlastností, kterou materiál bezpodmínečně musí splňovat je jeho pevnost a tvrdost. Tudíž nesmí docházet k ohybu jednotlivých dílců, aby se předešlo nepřesnému polohování vzorku, popřípadě otěru lineárních ložisek. Mezi další vlastnosti materiálu patří tepelná vodivost. Teplo šířené od zdroje (motor, třecí části) se snažíme kontinuálně rozptýlit do celé konstrukce tak, aby nedošlo větší tepelné dilataci jedné části stolku. Pokud by takový jev nastal, mohou se zdeformovat pohybové členy jako například lineární ložiska, která jsou pevně spojena šroubovým spojením k rovinné plošce stolu.

Jak již bylo řečeno, elektronový mikroskop využívá pro svou funkci proud elektronů. Elektrony jsou usměrňovány pomocí magnetického pole indukce. Pokud by materiál precizního manipulátoru obsahoval feromagnetické látky, odchýlil by tak směr proudu elektronů a znemožnil by tak přesnost měření. Proto materiál nesmí produkovat magnetické pole. V neposlední řadě se také dbá na hmotnost a možnost opracování povrchu materiálu. [3]

### 4.5.1 Zlato

Zlato je chemicky odolný, velmi dobře tepelně i elektricky vodivý, ale poměrně měkký a drahý kov. V současné době je důležitým materiálem v elektrotechnice, kde je ceněn za jeho nízký přechodový odpor a odolnost proti korozi. Samotné ryzí zlato je příliš měkké, proto jsou přidávány příměsi. Tyto sloučeniny (příměsi mědi, palladia, zinkem a jiné) mají zvýšenou tvrdost a pevnost. Zlato v konstrukci využíváme z magnetického hlediska. To nám umožní odstínit magnetické siločáry. Použití pro odstínění kabeláže, senzorů a povrchu otočné desky.

Důležitost zlata je především na poli magnetických vlastností. Tam ho řadíme mezi diamagnetické látky. (elektromagnetická pole se zcela zruší). Tepelná vodivost zlata je však velmi vysoká. [17] [13]

### 4.5.2 Měď

Měď je ušlechtilý kovový prvek načervenalé barvy. Vyznačuje se velmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí, dobře se mechanicky zpracovává a je odolná proti korozi. Tvoří základ součástí řady slitin. Čistá kovová měď je poměrně měkká, a proto se pro praktické aplikace často používají její slitiny s dalšími prvky (například bronz, slitina mědi a cínu, odstraňuje hlavní nedostatek, tvrdost). Měď je však velmi tažná a kujná.

Pokud by dosáhla teplota mědi vysokých hodnot, začala by vylučovat vodní páry (spojení vodíku a kyslíku). Tato vodní pára působí tlak na okolní strukturu materiálu, kde vznikají trhlinky.

Taktéž měď vyniká svými magnetickými vlastnostmi. Řadíme ji mezi diamagnetické látky. Měď má také vysoký součinitel tepelné vodivosti, podobně jako zlato. [17] [13]

### 4.5.3 Hliník

Hliník je velmi lehký kov bělavě šedé barvy, velmi dobrý vodič elektrického proudu, široce používaný v elektrotechnice. Další kladnou vlastností je jeho chemická odolnost. Hliník patří mezi nejvíce zastoupené prvky v zemské kůře.

Nejdůležitější je však uplatnění hliníku ve formě slitin, z nichž nejvýznamnější pro konstrukční prvky je slitina dural. Tento materiál má oproti samostatnému hliníku mnohem větší pevnost a tvrdost při zachování velmi malé hustoty. Zároveň jsou i značně odolné vůči korozi.



Hliník patří mezi paramagnetické látky (magnetické pole ruší jen částečně). Součinitel teplotní vodivosti hliníku je v porovnání s ostatními vhodnými látkami nízký. [17] [13]

## 4.6 Ložiska

Výběr vhodného typu ložiska pro umožnění daného pohybu, ať už rotačního nebo lineárního, je důležitou částí konstrukce sestavy. Jedná se o pohyby lineární (posuvná, vedení) a rotační. Lineární i rotační ložiska dělíme na několik skupin. Hlavní rozdělení ložisek je podle styku jednotlivých kluzných ploch. Dělíme je na ložiska kluzná, valivá a magnetická. Dále je dělíme podle směru zachytávání síly čili axiální a radiální.

### 4.6.1 Lineární ložiska

Lineární ložiska (posuvná) slouží k možnému pohybu jednotlivých os, to znamená pohyb pro osu x, y, z. Vedení musí splňovat důležité prvky při posuvu jednotlivých stolek. Minimalizace otěru součástí při posuvu. Přesný plynulý posuv bez zasekávání pohybujících se členů (segmentů) uvnitř vedení. Možnost upravení předepnutí a kolmost při možné dilataci součástí. Dalšími parametry jsou očekávaná únosnost a rozměrový posuv. Vakuum a proud elektronů, zapříčiní nemožnost použití ložiska hydraulického, pneumatického (obě kluzné) nebo magnetického.

#### Prizmatické vedení

Vedení (prizmatický vozík) s prizmatickou drážkou ve které jsou odvalovány v kleci valivá tělesa jako kuličky, válečky nebo jehly. Slouží pro zdvih nebo posuv předmětů v jakémkoli rozměrovém provedení. Jeho únosnost a tuhost převyšuje ostatní vedení, díky svému rozložení váhy do celého vozíku, respektive vedení. Tlumení vibrací zajišťují valivá tělesa uvnitř klece, které jsou mazány a umístěny do prizmatických drážek. Tlumení vibrací má však za následek větší rozměry součástí. Prizmatické vozíky nejsou konstruovány pro vakuové pásmo UHV, jelikož se zde často vyskytují duté mezery. Vozíky jsou také často vyráběny z feromagnetických materiálů. Jejich odstínění by způsobilo navýšení rozměrů součástí. [20]



Obr. 11) Prizmatické vedení [20]

#### Valivá ložiska

Posuv jedné lineární plochy po druhé umožňují valivé elementy uvnitř klece, která je umístěna mezi jednotlivými vedeními s drážkami. Elementy uvnitř klece mají tvar kuliček, válečků, jehel a jiných. Při pohybu dochází ke smykovému tření. Valivé elementy s celou klecí se pohybují ve směru pohybu, nejsou tudíž uchyceny k žádné ploše lineárního vedení. Všechny silové

působení jsou řešeny mechanicky. Valivé elementy jsou od sebe drženy ve stejných rozestupech díky kleci. Mechanický kontakt prvků znamená možnost otěru a mikro štěpení materiálu. Každé vedení má svou únosnost, danou délkou, šířkou a průměrem valivých elementů. Valivá ložiska jsou na trhu k dostání ve více materiálových kombinacích. Funkční plocha pro ustavení valivého vedení musí splňovat dostatečnou drsnost a rovinnost.

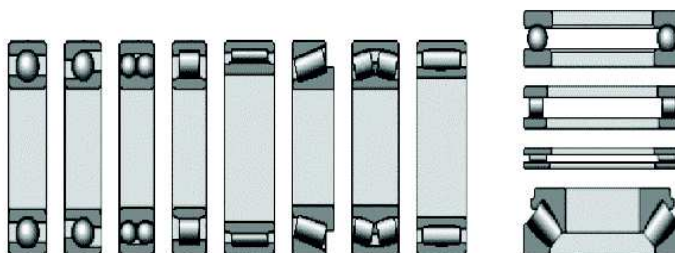


Obr. 12) Valivá ložiska lineární [21]

#### 4.6.2 Rotační ložiska

Rotační ložiska budou využita pro naklopení opce b ( $90^\circ$ ), otočení opce c  $360^\circ$  a také pro pohybové šrouby jednotlivých os. Pro ložisko opce b platí, že celá tuhost a přesnost konstrukce závisí na přesnosti tohoto ložiska. (rotační ložisko nese celou konstrukci-vybraná varianta A). Rotační ložiska mohou pohlcovat jak síly radiální, tak i axiální. Také rotační ložiska dělíme na několik druhů, volíme je podle druhu zatížení.

Rotační ložisko vhodné pro precizní manipulátor nesmí taktéž pracovat na základě hydrauliky, pneumatiky nebo magnetismu. Platí stejné zákonitosti jako u lineárního ložiska kvůli vakuu a magnetickému proudu elektronů. Proto u rotačního ložiska bude taktéž využito valivé ložisko jako u pohybu lineárního. [22]



Obr. 13) Rotační ložiska [22]

#### 4.6.3 Elektrický pohon s jezdcem

Pro lineární i rotační pohyb můžeme také využít takzvaný elektrický pohon s jezdcem. Tyto pohony v sobě obsahují všechny komponenty pro pohyb stolku (vzorku), uvnitř těla mechanismu. Samotný pohyb je obstaráván šrouby nebo řemeny. Elektrickou energii převedeme na mechanickou energii pomocí integrovaného motoru, který je taktéž obsažen v nerozebíratelném pouzdra mechanismu pohonu. Tyto pohony zaručují práci bez otěru

jednotlivých komponent, minimalizace rozměrů, odstínění magnetických účinků, redukci záření tepla a také se vyznačují vhodností umístění do velmi čistých prostor. Motor elektrického pohonu lze zvolit dle výchozích podmínek ve kterých bude pohon využíván. Dále se vyznačuje dobrou opakovatelností. Tyto elektrické pohony však nejsou určeny do vysokého vakua UHV (až  $10^{-7}$  Pa). [24]



Obr. 14) Elektrický pohon s jezdcem [23]

## 4.7 Motory soustavy

U elektrických motorů použitých pro pohon jednotlivých os bude kladen důraz na minimalizaci využití mezičlenů pro přenos kroutícího momentu (kloubové prvky) čili budou umístěny co možná nejbližší k pohybovým šroubům. Umístění elektromotorů v blízkosti os, způsobí nutnost práce ve vakuu, redukci odpadu ve formě tepla a kouře a zamezení tvorbě jisker. Elektrické motory se musí vyznačovat odpovídající opakovatelností a krokem (úhlem otočení) vhodnou pro elektronový mikroskop. Nezbytným prvkem je také minimalizace magnetů v konstrukci motorů.

Vzhledem k jejich umístění, budou elektromotory rozšiřovat potřebný prostor pro manipulátor ve vakuové komoře, dále také hrozí přenos tepla a vibrací do celé konstrukce stolu.

### 4.7.1 BLDC motor

Označení BLDC (z angl. Brush less direct current) tedy bezkartáčový stejnosměrný motor, vychází z principu stejnosměrného motoru. Na rozdíl od stejnosměrného motoru však nevyužívají pro komutaci kartáče, ale místo toho je komutace realizována elektronicky.

Bezkartáčový motor je synchronní stroj (rotor se točí stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole ve statoru) využívající stejnosměrný proud, který je však měněn pomocí měniče na střídavý proud. Střídavý proud se využívá pro řízení každé fáze motoru prostřednictvím regulátoru uzavřené smyčky. Regulátor poskytuje impulsy proudu na vinutí motoru, které řídí rychlost a točivý moment motoru. Pro správné rozvržení impulsů proudu přivedené na jednotlivé vinutí je třeba znát přesnou polohu rotoru. Snímání polohy rotoru lze docílit pomocí Hallova senzoru, enkodéry nebo bezsenzorové (snímání změn indukce; detekce průchodů nulou indukovaného napětí). [25]



#### 4.7.2 Krokový motor

Krokový motor je synchronní točivý stroj, který je napájen impulsy stejnosměrného proudu. Postupným napájením jednotlivých pólových dvojic je generováno magnetické pole. Přívlasek krokový dostal tento motor kvůli rotoru, který se při nízkých rychlostech, pohybuje mezi stabilními polohami vždy v určitém úhlu (stabilní klidové polohy = počet kroků). Počet kroků je dán počtem pólových dvojic. Vždy je zapotřebí řídicí elektronika (ovladač).

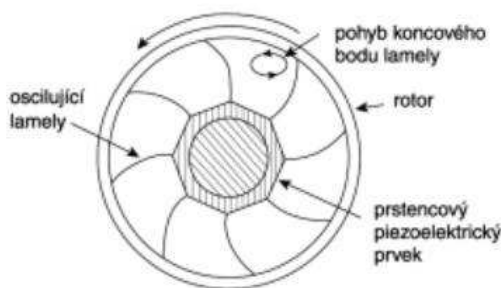
Tento druh motoru má velkou odolnost, dlouhou dobu životnosti a je téměř bezúdržbový. Mechanický kontakt (otěr) je pouze v ložiscích. Nevýhodou krokových motorů je ztráta kroku, tento jev nastává při překročení mezního zatížení. Dalším negativním faktem je možná nestabilita při pohybu, způsobená mechanickým zakmitáváním. Oba nechtěné vlastnosti motoru, lze vyloučit vhodnou volbou motoru a ovladače.

Úhel kroku je jmenovitý úhel, který odpovídá změně polohy rotoru po příchodu jednoho impulsu. Na velikost úhlu kroku má vliv konstrukce motoru, to znamená počet fází statoru, počet pólů rotoru a způsob řízení krokového motoru. [26] [27]

#### 4.7.3 Piezoelektrický motor

Piezoelektrický motor, též také motor pro mikropolohování, slouží pro velmi přesné nastavení polohy. Rozlišení pohybu měříme na desítky nanometrů, které spočívá v přivedení vhodně tvarovaného napětí. Piezoelektrický motor netvoří žádné magnety ani kartáče. Je zcela nemagnetický.

Princip piezoelektrického jevu spočívá přivedením elektrického napětí na některé krystaly nebo keramické materiály kde dochází k mechanické deformaci. Taková deformace však obvykle činí pouhé zlomky celkového rozměru materiálu (vychýlení manipulátoru o 1 mm je zapotřebí piezoelektrického materiálu o délce 1 m). Žádanou deformaci lze zesílit nebo pohyb složit z několika malých kroků poskytnutých piezoelektrickým materiálem. Piezoelektrický motor využívá fyzikálního jevu tření, což se výrazně liší od jiných motorů. Kde tření je naopak nechtěným jevem. [28] [29] [30] [31]



Obr. 15) Princip piezoelektrického motoru [30]

#### 4.8 Pohybový šroub s maticí

Pohybové šrouby s maticí převádějí rotační pohyb na pohyb lineární. Pro pohyb vzorku nebo jednotlivých os uvnitř vakuové komory je nutný jemný a přesný chod. Dále musí být zaručena tak jako u ložisek vysoká otěruvzdornost. Pohyb matice na pohybovém šroubu vyvolá teplo, které bude následně odváděno přes matici nebo ložisky do konstrukce manipulátoru. Vzniklé teplo může také způsobit dilataci pohybového šroubu, který ztratí svou účinnost. Proto zde musí být použity materiály s co možná nejmenší schopností otěru. Pohybové šrouby neponesou váhu stolku, slouží pouze k pohybu jednotlivých částí. Tíhu pojezdových členů přenáší lineární

vedení Práce ve vakuu zabraňuje použití mazacích past, které omezují tření a mírní vibrace. Proto budou zapotřebí speciální pohybové šrouby do vakua.



Obr. 16) Pohybový šroub s maticí [32]

## 5 VLASTNÍ VYPRACOVÁNÍ

Mým cílem diplomové práce bylo konstrukčně navrhnout funkční precizní manipulátor používaný jako stolek pro elektronový mikroskop. Jak již bylo řečeno, funkčnost konstrukce spočívá v mnoha faktorech danými pro práci ve vakuové komoře elektronovém mikroskopu. Manipulátor bude konstruován do vakua UHV ( $10^{-7}$  Pa).

K předešlému rozboru problémů, které se vážou k práci, byly dále přidány specifitější parametry výsledného konstrukčního řešení. Stolek bude využíván pro rastrovací elektronový mikroskop (SEM), dále hmotnost vzorku dosáhne až 0,4 kg. Minimalizace rozměrů a zachování přijatelné ceny jsou dalšími významnými prvky diplomové práce.

### Shrnutí vlastního vypracování:

- a) Pohyb v ose  $x = 100$  mm;  $y = 100$  mm;  $z = 40$  mm
- b) Opcí  $c = 360^\circ$ ;  $b = 90^\circ$
- c) Hmotnost zkoumaného preparátu až 0,4 kg
- d) Minimalizace rozměrů konstrukce
- e) Práce ve vakuu ( $10^{-7}$  Pa)
- f) Snadná a rozebíratelná konstrukce
- g) Minimalizace komponentů pro přenos momentu
- h) Cenová přijatelnost

### 5.1 Konstrukce

Koncepce neboli rozdělení pohybů konstrukce budou vycházet z varianty A. Tato varianta vyniká pro svou rozměrovou minimalizaci dílců a přehlednosti jednotlivých os a opcí. Vhodná je především pro rastrovací elektronový mikroskop (SEM) pro svou přístupnost ke vzorku z více stran. SEM vyžaduje přístup ke vzorku pro detektory, zachytávač radiace a záření, kameru a jiné potřebné mechanismy. Volbou této varianty bude také splněn zadaný parametr s přímým pohonem pohybových šroubů s minimalizací mezi nositele krouťacího momentu. Dalšími přednostmi varianty A budou nízká hmotnost a boční uchycení.

Záměnou opce b ( $90^\circ$ ) s osou pojezdu z (posunuta blíže k otáčivé desce stolu osy z), bude docílena vyšší pevnost celé konstrukce. Dále budou provedeny změny ve tvaru pro zmírnění vibrací. Také bude odstraněn přebytečný materiál pro odlehčení sestavy (bez dutých prostor). Bude vyžadována co nejdokonalejší rovinnost ploch, které budou sloužit jako základna pro ustavení vodících lineárních ložisek. Budou také využity možnosti spojovacích členů, které tak rozptýlí nadměrný vznik vibrací a zpomalí přenos tepla sdílením. Konstrukce se rozdělí na jednotlivé součásti, pro lepší opracování dílců ale také již zmíněný přenos tepla a vibrací.

### 5.2 Materiál-dural

Vhodný materiál pro konstrukci manipulátoru bude sloučenina hliníku (90-96%) a mědi (4-6%) s menšími dalšími přísadami. Sloučenina dural je nepatrně hustší než hliník, ale především mnohonásobně pevnější (v tahu) a tvrdší. Výborně se obrábí, což zajišťuje možnost neformálních tvarů a potřebných rovinných ploch. Chemická odolnost a korozivzdornost

zaručuje možné použití v náročných podmínkách vakuové komory. Výhodou duralu je také jeho nízká hmotnost  $2,8\text{g/cm}^3$ .

Nevýhodou duralu je malá elasticita (rozptyl elastické energie), která způsobí malou schopnost tlumení otřesů. Otřesy jsou nedílnou součástí motorů, pohybových šroubů a setrvačných sil způsobených pohybem vzorku. Proto musí být vibrace redukovány pomocí tvaru konstrukce a sestavení z více možných částí spojenými šroubovými spoji.

Další důležitou informací je tepelná roztažnost duralu. Dle výpočtu 61 se mění délka  $1\text{mm}$  o  $23\text{nm}$  při zvýšení teploty  $1^\circ\text{C}$ . Z výpočtu vyplývá poměrně velká tepelná roztažnost, se kterou se musí počítat při zkoumání preparátu. Vakuová komora se však snaží zamezit dilatacím, chladicí systémy udržují konzistentní teplotu jak uvnitř komory, tak také mimo ni. Celá místnost je klimatizována tak aby při výměně vzorku nedocházelo k dilataci.

Spojením látek hliníku s mědí vzniká paramagnetická sloučenina s lepšími vlastnostmi než samotný hliník. Tohle sloučení tedy vylepší elektromagnetické chování, kdy dural částečně zruší magnetické pole. [11] [17]

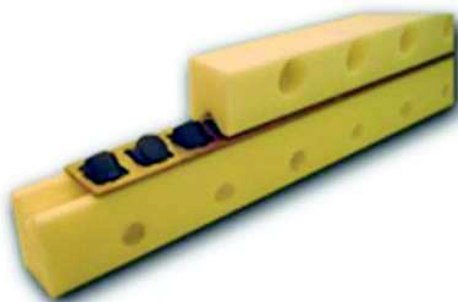
## 5.3 Ložiska

### 5.3.1 Lineární osa x, y, z – keramická válečková ložiska

Pro možný posuv členů po ose x, y a z budou využity keramická válečková lineární ložiska. Tyto ložiska využívají pohybu vnitřního členu (válečků) po pevných základnách, které jsou umístěny naproti sebe. Válečky využívají tření (odvalování). Díky využití keramiky zmenšujeme vliv otěru na poměrně nízkou úroveň. Dalším zlepšení oproti jiným materiálům na trhu je spolehlivější výkon, a to především díky menším ztrátám materiálu způsobeného otěrem. Přesné polohování je pro manipulátor nesmírně důležitým faktorem. (zachování tuhosti).

Odolnost proti vyšším teplotám způsobí menší tepelný přechod mezi jednotlivými částmi ložiska a také menší dilataci za chodu. Využitelnost keramických ložisek spadá také do vakuového prostředí. Avšak největším přínosem pro elektronový mikroskop je jeho nemagnetičnost. Silové magnetické čáry ložiska, tedy nebudou působit na proud elektronů a tím zpřesní výsledek měření. Nevýhodou keramického ložiska je její křehkost. Ta minimalizuje možnost posuvu ložiska při vzniklé dilataci. Posuv ložiska bude umožněn pomocí zápusných šroubů, které budou silově namáhat zadní část lineárního ložiska tak aby zůstal zachovaný požadovaný rozestup segmentové klece ložiska.

Pro konstrukční řešení byla vybrána keramická ložiska od firmy MN SYSTEMS. jednotlivé únosnosti ložisek byly vypočítány ve výpočtové části (62). [33]



Obr. 17) Keramická lineární ložiska [33]

### 5.3.2 Rotační opce b 90° – válečkové jednořadé

Ložisko rotační, které bude využíváno pro naklopení opce b (90°) bude zatíženo převážně statickou silou. Statická síla způsobuje velké zatížení jedné části ložiska (u rotace se mění zatížení na každý člen). Výrazné zatížení jednoho segmentu může způsobit otlačení a sním vzniklé nechtěné vibrace nebo teplo ložiska.

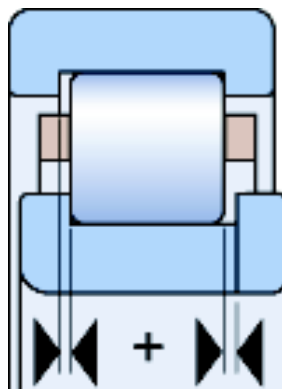
Kvůli převážně radiálnímu zatížení bude zvoleno válečkové ložisko jednořadé. To má oproti kuličkovým ložiskům vyšší radiální únosnost při stejném průměru vnitřních segmentů. Nevýhodou válečkového ložiska je omezená únosnost v axiálním směru. Dále se vyznačuje lepším zachytáváním rázů, snižování vibrací a přesnějším polohováním.

Na ložisko působí radiální síla způsobená hmotností vzorku a také celé konstrukce. Nesmí se také zapomenout na možnou axiální sílu vzniklou pojezdem jednotlivých členů. Pohybové členy vyvolají setrvačnou sílu, která může společně se statickým zatížením hrát určitou roli v porušení ložiska. Axiální síla bude zajištěná pomocí válečkového ložiska NUP. Statické zatížení valivých členů uvnitř ložiska (segmentů), může způsobit vibrace. Vibrace jakožto nepřítel elektronové mikroskopie musí být maximálně potlačen. Čárový styk válečků uvnitř ložiska musí být co největší, tak aby byla rozložena síla v co možná největší délce (ploše). Proto bude nutné ložisko předimenzovat.

Válečkové jednořadé ložisko bylo vybráno od firmy SKF. Výpočet vhodného ložiska byl uveden ve výpočtové části (63). Jak již bylo naznačeno, ložisko bylo několikanásobně předimenzováno.

#### Provedení ložiska NUP

Vnější kroužek má dvě příruby, vnitřní kroužek má jednu pevnou vodící přírubu a jednu volnou přírubu, kterou tvoří přírubový kroužek. Ložisko je tedy schopno přenášet axiální síly v obou směrech. [34]



Obr. 18) Provedení ložiska NUP [34]

### 5.3.3 Rotační opce c 360° - kuličkové jednořadé

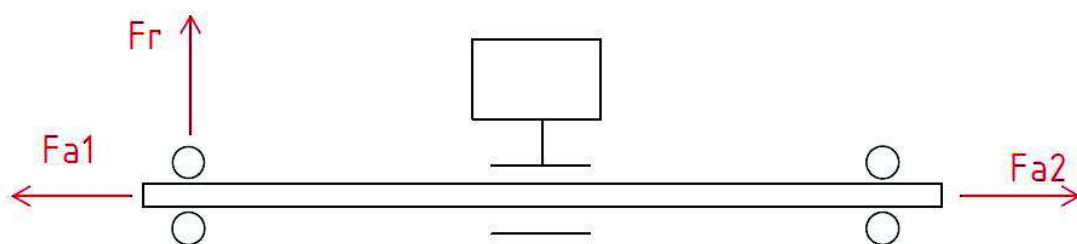
Ložisko umožňující rotační pohyb otočného stolku, bude zvoleno s ohledem na její střídavé zatěžování. Při poloze, kdy opce b=0° bude ložisko namáháno pouze axiálně, naopak když dosáhne opce b=90° ložisko zatíží pouze radiální složka síly. Smíšené zatížení zachytí nejlépe kuličkové ložisko. Vzhledem k problematice minimalizace rozměrů, bude vnitřní díra ložiska volena tak, aby vyhovovala rozměrům otočné desky. Ložisko bude namáháno hmotností otočné desky a preparátu na ní uložené.

Kuličkové ložisko jednořadé bylo vybráno od firmy SKF. Výpočet vhodného ložiska byl uveden ve výpočtové části. (74) [34]

#### 5.3.4 Rotační osa z – kuličkové jednořadé

Rotační kuličkové jednořadé ložisko určené pro uchycení pohybového šroubu osy z, bude zatíženo axiální silou. Axiální síla způsobená hmotností celé konstrukce a zkoumaného vzorku, která bude přenesena na ložisko přes pohybovou matici šroubu. Motor osy z bude přenášet na pohybový šroub kroutící moment, díky kterému bude matice schopná pohybu. Tuto sílu bude ložisko muset pojmout bez vzniklých vibrací, ohřevu nebo poškození. Kvůli možné tepelné dilataci šroubu, bude ložisko polohovatelné.

Kuličkové ložisko jednořadé bylo vybráno od firmy SKF. Výpočet vhodného ložiska byl uveden ve výpočtové části (67). Ložisko bylo vypočítáno pro hodnotu opce  $b=0^\circ$ . [34]



Obr. 19) Model možných sil působících na ložiska

#### 5.3.5 Rotační osa y – kuličková jednořadá

Rotační kuličkové jednořadé ložisko pro uchycení pohybového šroubu osy y, bude namáháno při otáčení opce b (max.  $90^\circ$ ). Z vertikální polohy se stane horizontální a tím budou ložiska zatížena hmotností stolu y. Axiální sílu vytvořenou pootočením manipulátoru, ložisko snese bez vzniklých vibrací, ohřevu a poškození. Kvůli možné tepelné dilataci šroubu bude ložisko polohovatelné.

Kuličkové ložisko jednořadé bylo vybráno od firmy SKF, Výpočet vhodného ložiska byl uveden ve výpočtové části (70). [34]

#### 5.3.6 Rotační osa x – kuličková jednořadá

Ložiska použity pro uchycení pohybového šroubu osy x nebudou zatíženy žádnými výraznými momenty síly. Proto bude jejich volba záležet na jejich velikosti (minimalizace konstrukce) a materiálu (diamagnetický/paramagnetický materiál). Budou použity kuličková jednořadá ložiska. Ty díky svým vlastnostem slouží jako univerzální ložiska. Kvůli možné tepelné dilataci šroubu bude ložisko polohovatelné.

Kuličkové ložisko jednořadé bylo vybráno od firmy SKF.

### 5.4 Pohon osy x, y, z, opce b – krokový motor

Pro přeměnu elektrické energie na energii mechanickou bylo využito krokového motoru (osa x, y, z a opce b ( $90^\circ$ )). Jak již bylo řečeno, tento typ motoru generuje magnetické pole, které není kompatibilní s funkcí pro elektronový mikroskop. Tohoto nechtěného jevu lze zabránit



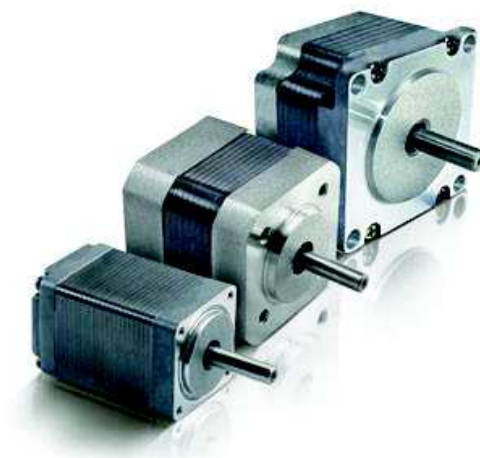
pomocí magnetického stínění. Odstínění pomocí diamagnetických látek potlačí vyzařování magnetických siločar z elektromotoru.

Kvůli svým malým rozměrům se minimalizuje možnost vytváření záchvěvů elektromotoru. Také zvolení a naprogramování vhodného ovladače zabrání možným ztrátám kroku a chvění. Negativním prvkem krokového elektromotoru zůstává vznik tepla, který způsobuje dilataci okolních součástí.

Velkou předností krokových motorů je, že pracují bez nákladných, rozměrových a hmotných snímačů otáček nebo polohy. Jsou jednodušší a tím provozně spolehlivější a levnější. Řízení se provádí bez zpětné vazby. Dále jsou tu kladné vlastnosti jako vysoká životnost a bezúdržbovost. Úhel kroku činí  $1,8^\circ$  to je, 200 kroků na otáčku. Pokud upravíme řízení motoru na mikrokrokování dostaneme mnohem více kroků pro nastavení polohy (až 256x). mikrokrokováním však motor ztrácí maximální výkon, kladnými vlastnostmi je naopak zmírnění hluku a vibrací. Posuv se dopočítá ze stoupání závitu šroubu.

Krokové motory byly vybrány od firmy Servo-driver. Motory byly testovány na úroveň vakua  $10^{-7}$  Pa. U motorů bylo použito vysokoteplotní vinutí a teflonové přívodní kabely. Dále byly odstraněny veškeré nátěry a maziva.

Motory byly vyráběny pomocí speciálních čistících procesů kombinující zahřátí ve vakuu, které zplynuje zbytky kontaminantů. Také ložiska uvnitř motorů jsou schopné pracovat v teplotách  $-80$  až  $204^\circ\text{C}$ , což se promítne do maximální tepoty těla motoru která, aby neshořelo vinutí je  $125^\circ\text{C}$ . Konstrukce také snižuje odvod tepla z motoru. Výpočty vhodných motorů byly uvedeny ve výpočtové části (75) [35]



Obr. 20) Krokové motory od firmy Servo-driver [35]

## 5.5 Pohon opce c – piezoelektrický motor

Motor s piezoelektrickým jevem bude využit na možnou tomografii čili na rotační stůl (Opce c  $360^\circ$ ). Volba piezoelektrického (dále jen piezo) motoru pro tento pohyb vychází z problematiky, která nastává u tohoto typu otáčení. Základní a nejpodstatnější vlastností je míra vzniklých vibrací. Piezo motor vyniká opravdu malou produkcí vibrací. To bude vzhledem k vybrané konstrukci vhodnou volbou. Dle vybrané konstrukce bude umístěn motor uvnitř stolku pod otočnou deskou. Dále nesmíme zapomenout na generaci tepla, který na rozdíl od krokových motorů nevzniká v takovém množství. Tyto dvě vlastnosti výrazně převládají nad negativním faktorem, jakou je cena motoru.

Piezo motor není jen pohlcovač vibrací nebo izolant tepla, je také přesnějším, co se týká nastavení polohy. Díky mikropolohování (pohyb měříme na desítky nanometrů) poslouží k přesnějšímu mapování a tomografii. Úhel kroku  $0,004^\circ$  což je 90 000 kroků za otáčku. Opce C bude nejvíce používaným pohybem, a proto je nesmírně důležitá správná volba motoru pro možné otáčení preparátu. Mezi hlavní aspektem patří také jeho bezmagnetovost. Čili nevytváří žádné magnetické pole při chodu. Tím nebude řešeno odstínění motoru, což zmenší rozměr a sníží hmotnost.

Stolek bude zkonstruován z materiálu dural ten, jak již bylo zmíněno nepohlcuje efektivně vibrace. Pokud by byl zvolen jiný motor, musela by být použita jiná varianta umístění motoru. To by však znamenalo další převody, popřípadě mezičleny, zatížení a sním spojené generování tepla. Magnetické pole generované krokovým motorem by nemohlo být dostatečně odstíněno, proto by docházelo k odklonění proudu elektronů. Všechny tyto nechtěné aspekty odstraní použití piezoelektrického motoru.

Piezo motory na trhu nejsou jen nízké co se týče generaci vibrací nebo tepla, jsou také malé rozměrově a výkonově. Vybraný model LR50 od firmy PiezoMOTOR s.r.o. bude dostatečný pro pohyb opce c preparátu. Vypočítaný potřebný moment motoru je uveden ve výpočtové části (67) [36]



Obr. 21) Piezoelektrický motor od firmy Piezomotor [36]

## 5.6 Pohybové šrouby a matice

Pro přeměnu kroutícího momentu na lineární pohyb, poslouží pohybový šroub s maticí. Přesnost a spolehlivost je výsadou pro tento pohyb. Pohybové šrouby s maticí pomoci jemného závitu přinesou dostatečně přesný, plynulý a pomalý chod. Výhodou je také jejich snadná rozebíratelnost. Pohybové šrouby nebudou zatíženy hmotností břemene. Slouží pouze pro přeměnu momentu na lineární pohyb.

Firma SERVO-DRIVE nabízí válcované přesné pohybové trapézové šrouby a matice vhodné do vakua. Šrouby jsou vyráběny válcováním a matice jsou odlévány z odolného a tvrdého polyacetátu s dlouhou životností, dále jsou plněné skelnými vlákny pro vysokou pevnost. To zaručí nízký třecí koeficient čili vynikající odolnost proti otěru a tím vzniku tepla. Dále je použit teflon, tato kombinace je vhodná do prostřední bez maziv a do vysokých teplot. Úchylka stoupání šroubu  $0,1/600$  mm. Pohybové šrouby jsou umístěny v ložiscích, Jedno z ložisek je vždy polohovatelné pro možnou rozměrovou nestálost při dilataci šroubu.

Matice byla volena s ohledem na její únosnost, dále byl k matici přiřazen průměr šroubu tak aby splňoval podmínky účinnosti. Matice pohybového šroubu jsou předepnuty. [37]





Obr. 22) Pohybový šroub od firmy Servo-drive [37]

## 5.7 Šnekové soukolí

Pro umožnění opce b, bude využito šnekového soukolí s globoidním šnekem a globoidním kolem. Tento typ šnekového soukolí má velký převodový poměr, co snižuje rozměry krokového elektromotoru využívaného jako jeho pohon. Parametr minimalizace konstrukce obstará vztah výkon/rozměr, což také snižuje výrazně hmotnost součástí. U globoidních provedení je v záběru více zubů, proto je chod klidný a tichý. Více zubů také znamená menší pravděpodobnost otěru, a především malý vznik tepla. Dále se může vyrábět z materiálu hliníkový bronz, který patří mezi paramagnetické pátky. Důležitou výhodou soukolí je také její samosvornost. Nevýhodou je však dražší výroba, důraz na přesnost geometrie a cena.

Minimální průměr šnekového soukolí byl zvolen vzhledem k průměru ložiska pro opci b. Šnekové soukolí bylo vybráno od firmy T.E.A. Technik s.r.o. Šnekové soukolí s globoidním šnekem a globoidním kolem budou vyrobeny na požadavky zákazníka. Podle počítačové simulace a výpočetní techniky, obeznámí zákazníka s výstupními hodnotami navrhovaného soukolí. [23]



Obr. 23) Šnekové soukolí [18]

## 5.8 Koncové spínače

Kolizi jednotlivých součástí stolku, bude zabráněno použitím koncových spínačů. Koncové spínače mají ochránit nejen pohybový manipulátor se vzorkem, ale i ostatní části elektronového mikroskopu jako jsou čočka, tryska, detektory nebo pohlcovače radiací. Najetím pohybového stolku do pevné části konstrukce, by došlo k celkovému otřesu mechanismu, čím by se mohl narušit celý proces měření. To by znamenalo znovu seřízení všech komponentů celého stroje. Proto je kladem velmi vysoký důraz na funkčnost, spolehlivost a kvalitu koncových spínačů. Dále je nutné zajistit polohování senzorů, vzhledem k možným dilatacím, popřípadě zkracováním pracovního rozsahu kvůli vícerozměrným preparátům.

Byl vybrán mechanický koncový spínač s pákou od firmy Panasonic. Vakuum a magnetické pole neumožňují využití jiných senzorů.



Obr. 24) Mechanický koncový spínač od firmy Panasonic [38]

### 5.9 Vyrovnání vedení pomocí bezhlavých šroubů

Možná dilatace materiálu, tudíž celé konstrukce stolku, může znamenat posunutí důležitých komponent, jako jsou například lineární ložiska (vedení). Vedení je spojeno s konstrukcí pomocí šroubů. Tepelná roztažnost může posunout a vychýlit vedení a tím zapříčinit otěr valivých segmentů uvnitř vedení. Vedení samo o sobě má úchytky roztažnosti a dokáže mírné odchylky redukovat. Pro případ, kdy vedení nebude schopno pojmout takovou změnu mezery mezi valivými segmenty, budou použity bezhlavé šrouby viz obrázek [25].



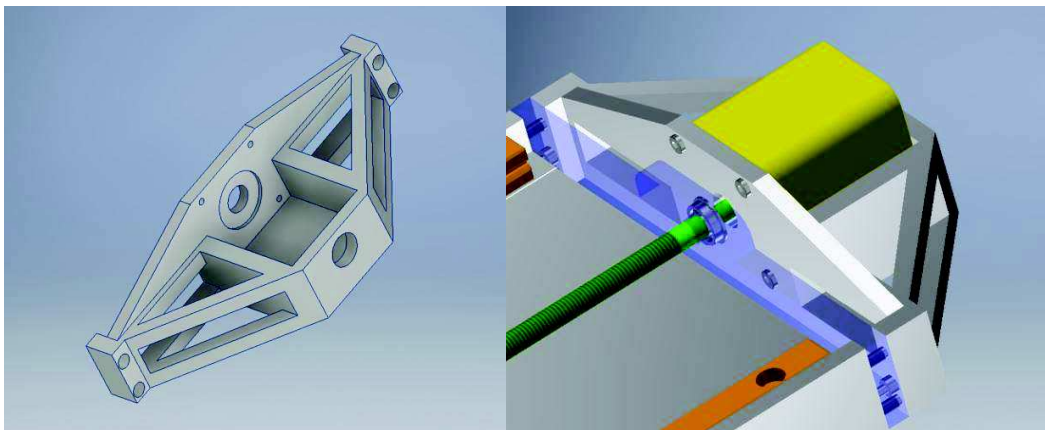
Obr. 25) Bezhlavé šrouby [41]

### 5.10 Odstínění motoru

Motor, jakožto největší strůjce vibrací, může být umístěn odděleně od zbytku soustavy. Oddělení zabraňuje šíření chvění a přenosu tepla na konstrukci. Šíření vibrací ať už od motoru nebo pohybových částí se snažíme minimalizovat na co nejmenší možnou míru. K tomu bude dopomáhat ustavení motoru na podpurný držák, který bude pomocí šroubů uchycen k základnímu stolu. Tvar držáku je navrhnut tak, aby co nejvíce eliminoval možné vibrace.

Z obr. 26 vyplývá prodloužená délka stolu, což odporuje parametru minimalizace soustavy. Také se zvyšuje hmotnost sestavy. Testování konstrukce by zjistilo o jakou hodnotu prodloužený stůl zmenší chvění a také zabránil šíření tepla. Jedná se o možný návrh, který zamezí prostupu vibrací a tepla do konstrukce. Další možnou variantou je například obr 27, kde

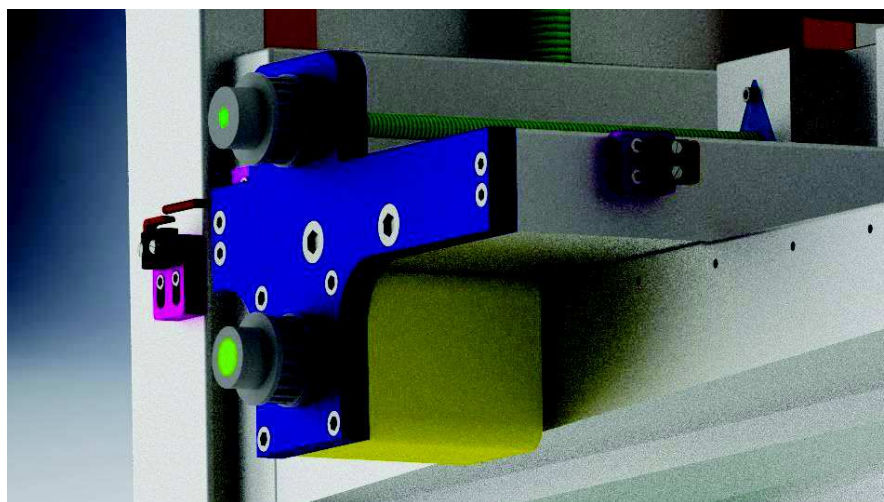
je umístěn motor pod stolem osy. Zde byla upřednostněna rozměrová minimalizace před snížením vibrací a tepla.



Obr. 26) Odstínění motoru

### 5.11 Umístění motoru pod vedení osy x

Pro dodržení parametru minimalizace konstrukce byl navrhnut motor pohánějící osu x pod vedení příslušné osy. Pomocí ozubeného řemene bude přenášet kroutící moment na pohybový šroub. Tohle uzpůsobení pohonu bezpochyby vyvolá ztráty vedením a také ztrátu účinnosti. Pravděpodobně tím nej znepokojujícím jevem nebude ztráta kroutícího momentu, nýbrž přenos tepla a vibrací na stůl osy y. Způsobené dilatace se budou šířit sdílením tepla do celého manipulátoru. Zahřívání motoru způsobí také zvýšení chvění. Všechny tyto jevy by musely být testovány pro přesnější informace. Na obr. 27 můžeme vidět ustavení motoru pro pohyb osy y.



Obr. 27) Umístění motoru pod stolem

#### 5.11.1 Řemenový převod

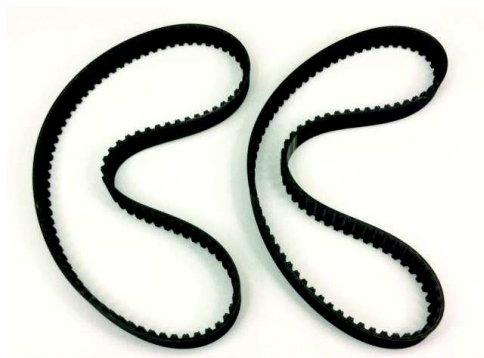
Za účelem minimalizace rozměrů konstrukce byl zvolen řemenový převod pro přenos mechanické energie z hřídele motoru na pohybový šroub osy x. Jelikož by krokový motor rozšířil potřebný prostor pro manipulátor uvnitř vakuové komory, byla zvolena varianta s mezičlenem. Ozubené čelní kola budou vyrobená z hliníkového materiálu.

### 5.11.2 Ozubený řemen polyuretan + povrchová úprava

Bude použit speciální řemen, který svými vlastnostmi dokáže obstát vlivům vakua a teplotní změny. Dále musí splňovat účinnost, spolehlivost a minimalizace otěru.

Polyuretanový řemen s kombinací ocelových vláken splňuje kritéria práce ve vakuové komoře elektronového mikroskopu. Vyniká svou pevností, nemagnetičností a odolností podtlaku. Tyto řemeny se dají dále upravovat podle potřeb zákazníka. Výroba na míru odstraňuje existenci spoje čili tažná kostra není přerušena.

Volba ozubeného řemenu typu polyuretan FLEX s úpravou od firmy Pikron belt drives. [39]



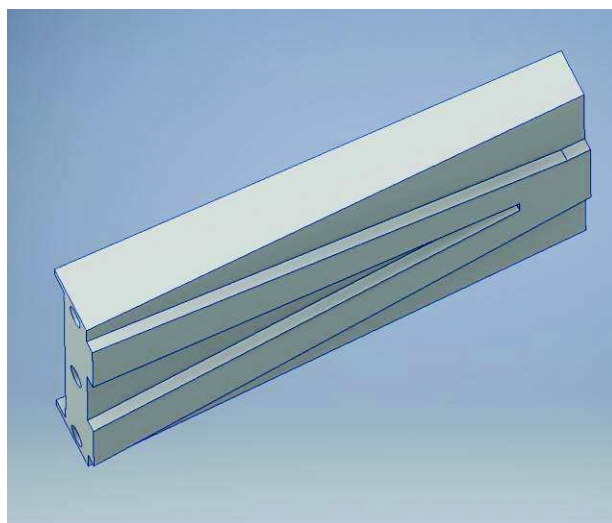
Obr. 28) Ozubený řemen od firmy Pikron belt drives [39]

## 5.12 Konstrukční detaily

### Tvarování součástí

Celá konstrukce stolu bude tvarována jak pro zlehčení sestavy, tak pro eliminaci vibrací. Jednotlivé části mechanismu budou opracovávány a navzájem spojeny pomocí spojovacích součástí (šroubů). Oddělení součástí jednoznačně zabrání šíření vibrací a vedení tepla. Obr. 29 ukazuje možné tvarování proti vibracím.

Dále jsou dostupné prostředky na útlum vibrací, jako jsou antivibrační nátěry. Složení antivibračních nátěrů je schopno snášet teplotní výkyvy. Využití ve vakuu s procházejícími elektrony, které emitují při nárazu na vzorek radiaci, záření a vlnění, nebude však možné.



Obr. 29) Tvarování součástí

## Otočná plocha pro upínání vzorku

Samotné místo pro ustavení preparátu (Opce c 360°), bude vybaveno různými druhy uchycení zkoumaného vzorku. Vzorek může být rozměrově a hmotnostně odlišný. Dále se mění uchycení vzorku neboli předpříprava vzorku. Ta může zahrnovat zmrazení preparátu, umístění vzorku do vosku, nebo jiné ustavení na otočnou desku. Samotná otočná deska bude vybavena příslušným upínacím zařízením. SEM dále vyžaduje vhodnou volbu materiálu otočné desky. Rastrovací mikroskop chytá odrazené proudy elektronů do detektoru, ze kterých následně skládá výsledný obraz. Kdyby materiál desky nebyl diamagnetický, nemuselo by dojít k přesnému měření. [3]

## Spojovací šrouby

Jednotlivé součásti budou k sobě připevněny pomocí šroubových spojů. Tyto šrouby vzhledem k nedostatku místa a minimalizaci rozměrů, budou zapuštěny do materiálu. Hlava šroubu bude mít imbusovou drážku pro dotáhnutí. Šrouby budou vyrobeny ze slitin hliníku kvůli magnetickým siločárám a také z důvodů volby materiálu konstrukce již je dural.

## Kabeláž

K prvkům, které potřebují ke své funkci elektrickou energii (motory, senzory), budou dovedeny dráty v příslušném vedení. Vedení musí být pružné, ohebné ale také dostatečně pevné. Pohybu součástí nesmí bránit žádný kabel, proto toto vedení bude upevněno na konstrukci tak, aby se předešlo možným kolizím. Dráty budou uschovány uvnitř pružinového vedení.

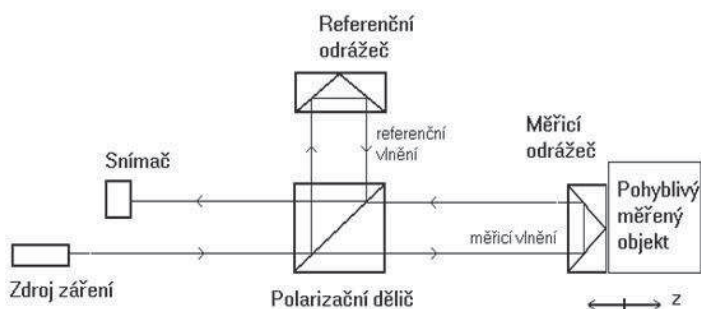
## Optická měření

Elektronový mikrometr pozorující atomy materiálu, potřebuje nutně ke své práci dokonalou rovinnost či kolmost. Jak pro plochy pro ustavení lineárního ložiska, tak pro ustavení všech jednotlivých součástí, které budou pomocí šroubových spojů spojeny.

## Optické metody měření

Proud elektronů procházející kondenzátorem (elektronovou čočkou) popřípadě projekční čočkou, požaduje přesné polohování zkušební vzorku. Tím je myšlena kolmost, popřípadě rovinnost precizního manipulátoru. K dosažení takové roviny slouží optická měřidla, která tomuto jevu předejdou.

V současné době je výzkum týkající se trojrozměrného (3D) měření tvarů a rozměrů předmětu optickými cestami ve fázi rychlého rozvoje. Přesné, rychlé a nekontaktní optické metody měření jsou významné v mnoha průmyslových aplikacích jako jsou například kontroly povrchů. V současné době jsou optická měření založena na třech hlavních principech. (triangulace, optická interferometrie, měření doby letu modulovaného světla). Pro náš problém s rovinností, popřípadě kolmostí, poslouží nejlépe optická interferometrie.



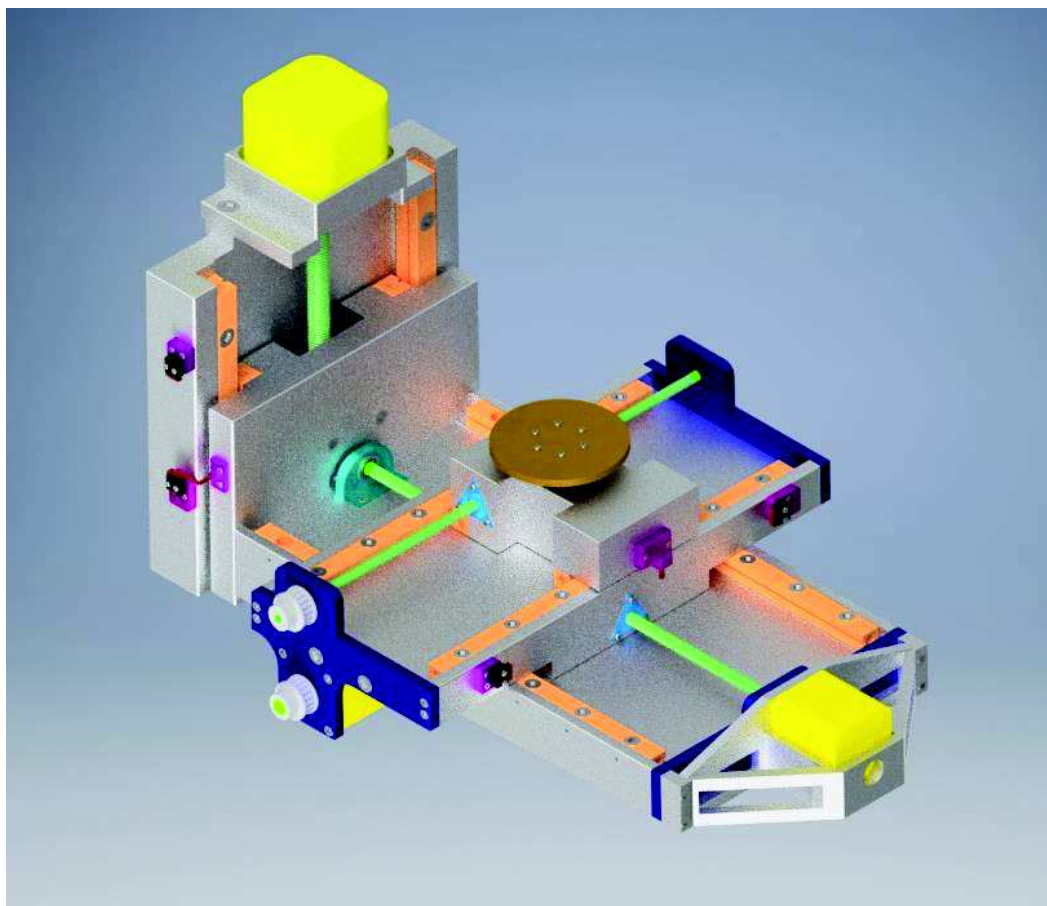
Obr. 30) Schéma optické interferometrie [40]



### 5.13 Konstrukční řešení.

Úkolem diplomové práce bylo navrhnout konstrukční řešení precizního manipulátoru využívaného jako stolek elektronového mikroskopu. Zde zkompletuji vybranou variantu a technické parametry sestavy. Jednotlivé změny v umístění motorů z důvodů šíření tepla a vibrací, byly prokonzultovány.

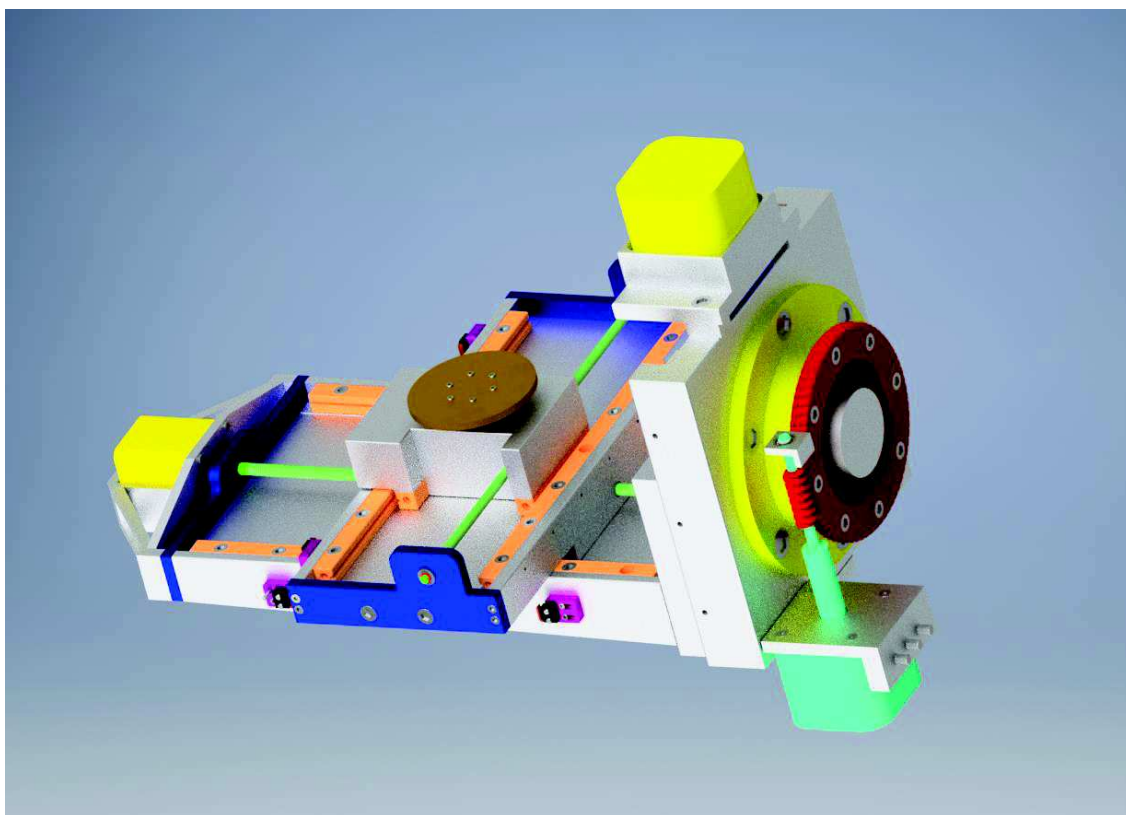
Dural jako výchozí materiál konstrukce splňuje paramagnetické vlastnosti látky, pevnost a tvrdost konstrukce, redukuje hmotnost a umožňuje dobrou obrobitelnost funkčních ploch, Na obr. 31 můžete vidět navrženou konstrukci. Skládá se z výše uvedených komponentů. Generátorem krouticího momentu byl zvolen krokový motor pro osy x, y, z a opci b, pro opci c pak piezoelektrický motor. K přeměně krouticího momentu na pohyb lineární poslouží trapézový teflonový pohybový šroub s předepnutou maticí. Posuv jednotlivých os bez tření, umožní lineární ložiska vyrobená z keramického materiálu pro lepší snášení magnetických i pevnostních kritérií. Nesmíme zapomenout na bezpečnostní (koncové) spínače. Pohybové šrouby jsou umístěny v axiálních ložiscích, které snesou i dilataci šroubu.



Obr. 31) Konstrukce 1

Na obr. 32 je zobrazeno šnekové soukolí s již zmíněným krokovým motorem. Šnekové soukolí (globoidní šnek i kolo) slouží k polohování opce b. Důležitou součástí manipulátoru je rotační válečkové ložisko, které je staticky namáháno radiálním zatížením od hmotnosti konstrukce a vzorku.

Všechny zmíněné komponenty se shodují s vlastnostmi vakuové komory. Jedná se o paramagnetické/diamagnetické látky pro zamezení magnetismu. Schopnost práce ve vakuu, otěru vzdornost, malou generaci tepla a vibrací, přesnost, tuhost,



Obr. 32) Konstrukce 2

Celkové rozměry manipulátoru činí 350x212x210 mm. Pracovní rozsah pohybu vzorku 105x103x40 mm + opce b 90° a opce c 360°. Hmotnost konstrukce 6 kg. Motory i pohybový šroub s maticí splňují pomalý a plynulý chod. Úhel krokového motoru je 1,8° na krok (na celou otáčku 200 kroků) Při mikrokrokování krokového motoru může hodnota výrazně vzrůst. Úhel piezo motoru umístěného pod otočnou deskou je 0,004° na krok, což je 90 000 kroků na celou otáčku. Schopnost posuvu na jeden krok motoru se liší vzhledem ke stoupání závitu daného pohybového šroubu. Osa x bude polohována s přesností na jeden krok o 31,7 μm, osa y 50,8 μm a osa z 63,5 μm. Pro tyto hodnoty nebylo použito mikrokrokování. Celá konstrukce je paramagnetická, pro odstínění některých feromagnetických látek, můžeme použít pozlacení.

## 6 VÝPOČTY

### 6.1 Tepelná roztažnost dural

Výpočet tepelné roztažnosti materiálu dural.

$$k = 23 \cdot 10^{-6} \text{ m/mK}$$

$$l_0 = 1 \text{ mm}$$

$$\Delta t = 1^\circ \text{C}$$

$$\Delta l = l_0 \cdot k \cdot \Delta t \quad (61)$$

$$\Delta l = 0,001 \cdot 0,023 \cdot 10^{-3} \cdot 1$$

$$\Delta l = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 23 \text{ nm}$$

Z výpočtu vyplývá poměrně značná tepelná roztažnost materiálu. Kdy z původní délky 1 mm se materiál roztáhne o 23nm při změně teploty o 1°C.

kde:

$k$	[m/mK]	koeficient lineární teplotní roztažnosti duralu
$l_0$	[mm]	počáteční měřená délka
$\Delta t$	[°C]	rozdíl teploty
$\Delta l$	[m]	prodloužení délky

### 6.2 Lineární vedení keramické

Z následujících výpočtů budou určeny průměry valivých segmentů a rozměry lineárních ložisek pro jednotlivé osy.

#### 6.2.1 Osa x:

$$m_x = 1 \text{ kg}$$

$$F_x = 10 \text{ N}$$

$$l_x = 50 \text{ mm} = 5 \text{ cm}$$

$$p_x = 4,5 \text{ Ncm} \quad \text{pro průměr válečku 3 mm}$$

$$n_x = p_x \cdot l_x \quad (62)$$

$$n_x = 22,5 \text{ Ncm} > F_y$$

Zatížení vyhovuje:  $n_x > F_x$ , volím lineární ložisko RSD 3050+3175 od firmy MN SYSTEMS



### 6.2.2 Osa y:

$$m_y = 2,5kg$$

$$F_y = 25N$$

$$l_y = 75mm = 7,5cm$$

$$p_y = 4,5Ncm \quad \text{pro průměr válečku 3mm}$$

$$n_y = p_y \cdot l_y \quad (62)$$

$$n_y = 33,75Ncm > F_y$$

Zatížení vyhovuje:  $n_y > F_y$ , volím lineární ložisko RSD 3075+3200 od firmy MN SYSTEMS

### 6.2.3 Osa z:

$$m_z = 4,5kg$$

$$F_z = 45N$$

$$l_z = 80mm = 8cm$$

$$p_z = 11,5Ncm \quad \text{pro průměr válečku 4mm}$$

$$n_z = p_z \cdot l_z \quad (62)$$

$$n_z = 92Ncm > F_z$$

Zatížení vyhovuje:  $n_z > F_z$ , volím lineární ložisko RSD 4080+4120 od firmy MN SYSTEMS

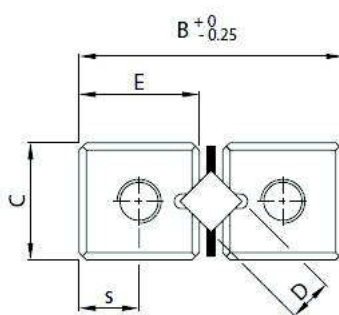
kde:

$m$	[kg]	hmotnost dané soustavy
$F$	[N]	zatěžující síla
$l$	[mm]	délka vedení stolu
$p$	[Ncm]	maximální zatížení válečku pro daný průměr
$n$	[Ncm]	maximální zatížení délky vedení

## 6.2.4 Jednotlivé parametry lineárního ložiska od firmy MN SYSTEMS

Tab 3) Parametry zvolených lineárních ložisek [33]

Označení ložiska	Hlavní rozměry ložiska				
	A [mm]	B [mm]	C [mm]	E [mm]	D [mm]
RSD 3050	50	18	8	8,25	3
RSD 3175	175	18	8	8,25	3
RSD 3075	75	18	8	8,25	3
RSD 3200	200	18	8	8,25	3
RSD 4080	80	22	11	10	4
RSD 4120	120	22	11	10	4



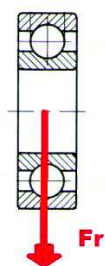
Obr. 33) Schéma rozměrů lineárního ložiska [33]

## 6.3 Ložiska

### 6.3.1 Ložisko opce b (90°)

Ložisko bude převážně zatěžováno staticky radiální složkou síly, to znamená velké namáhání stejných stykových ploch. Výpočet bude zaměřen na statickou únosnost.

Statická únosnost  $C_o$  závisí na plastické deformaci; ložisko vykonává pomalé pohyby s nepřetržitým zatížením.



Obr. 34) Radiální síla působící na ložisko

$Y_{ob} = 0$  dle válečkových ložisek (nepřenáší axiální sílu)

$$X_{ob} = 1$$

$$C_o = S_o \cdot P_o > S_o = \frac{C_o}{P_o} \quad (63)$$

$$m_b = 6kg$$

$$F_{rb} = 60N = 0,06kN$$

$$F_{ab} = 0kN \quad (\text{posuvové a setrvační síly})$$

$$P_{ob} = X_{ob} \cdot F_{rb} + Y_{ob} \cdot F_{ab} \quad (64)$$

$$P_{ob} = 1.60 + 0.0$$

$$P_{ob} = 60N = 0,06kN$$

$$C_{ob} = 36,5kN$$

$$S_{ob} = \frac{36,5}{0,06}$$

$$S_{ob} = 608 > 5$$

Součinitel statické bezpečnosti  $S_{ob}$  – pro klidný, tichý chod  $S_{ob} > 5$  pro čárový styk

Volím ložisko s čárovým stykem typu NUP jednořadé (válečkové).

**NUP:** zachycení axiální síly; možnost setrvačných styl pohybujících se částí stolku.

Předimenzování ložiska kvůli maximálnímu zachycení vibrací. U ložisek zatížených staticky hrozí možnost otlačení segmentů do klece ložiska – plastická deformace. Precizní manipulátor musí splňovat vysoká kritéria přesnosti a spolehlivost. Proto volba ložiska s několikanásobnou bezpečností.

Ložisko od firmy SKF typu NUP 206 ECP

$$B_b = 16 \text{ mm}$$

$$D_b = 62 \text{ mm}$$

$$d_b = 30 \text{ mm}$$

$$C_{ob} = 36.5 \text{ kN}$$

### 6.3.2 Ložiska pohybového šroubu osy z

Na ložiskách, při základní poloze (opce  $b = 0^\circ$ ), bude nepřetržitě působit axiální síla (hmotnost) od části konstrukce a vzorku. Proto musí být proveden výpočet.

$$m_z = 4,5kg$$

$$F_{az} = 45N = 0,045kN$$

$$F_{rz} = 0kN$$

$$e = \frac{F_a}{F_r} \quad (65)$$

$$e_z = \frac{0,045}{0}$$

$$e_z \geq 0,22 \rightarrow Y_{oz} = 1; X_{oz} = 0 \quad (\text{dle tabulky hodnot})$$

$$Y_{oz} = 1$$

$$X_{oz} = 0$$

$$P_{oz} = X_{oz} \cdot F_{rz} + Y_{oz} \cdot F_{az} \quad (66)$$

$$P_{oz} = 0,045 \text{ kN}$$

$$C_{oz} = 0,26 \text{ kN}$$

$$S_{oz} = \frac{0,26}{0,045} \quad (67)$$

$$S_{oz} = 5,7 > 3$$

Vyhovuje podmínke ve využití v klidných podmínkách bez vibrací a zahřívání

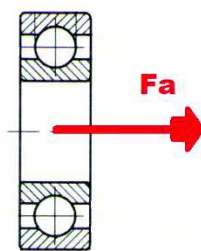
Ložisko od firmy SKF typu 618/7

$$B_z = 3,5 \text{ mm}$$

$$D_z = 14 \text{ mm}$$

$$d_z = 7 \text{ mm}$$

$$C_{oz} = 0,26 \text{ kN}$$



Obr. 35) Axiální síla působící na ložisko

### 6.3.3 Ložisko pro osu y

Ložiska pro pohybový šroub osy y, mohou být taktéž zatíženy axiální silou. K axiální síle dochází při pootočené stolu (opce b) o 90°, kdy se z horizontální pozice stolu, stává vertikální. Ložiska pro osu y budou v tuto chvíli zatížena hmotností výstupního stolku a zkoumaného preparátu.

$$e_y \geq 0,22 \rightarrow Y_{oy} = 0; X_{oy} = 1 \quad (68)$$

$$Y_{oy} = 0$$

$$X_{oy} = 1$$

$$m_y = 1 \text{ kg}$$

$$F_{ay} = 10 \text{ N} = 0,01 \text{ kN}$$

$$F_{ry} = 0 \text{ kN}$$

$$P_{oy} = X_{oy} \cdot F_{ry} + Y_{oy} \cdot F_{ay} \quad (69)$$

$$P_{oy} = 0,01 \text{ kN}$$

$$C_{oy} = 0,036 \text{ kN}$$

$$S_{oy} = \frac{0,036}{0,01} \quad (70)$$

$$S_{oy} = 3,6 > 3$$

Vyhovuje podmínke ve využití v klidných podmínkách bez vibrací a zahřívání

Ložisko od firmy SKF typu W 637-2Z

$$B_x = 2,5 \text{ mm}$$

$$D_x = 6 \text{ mm}$$

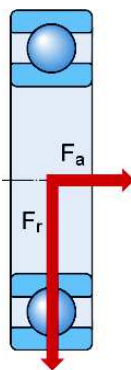
$$d_x = 3 \text{ mm}$$

$$C_{ox} = 0,036 \text{ kN}$$

#### 6.4 Ložisko pro opci c 360°

Ložisko pro umožnění otáčivého pohybu otočné desky bude zatíženo ve výchozí poloze pouze axiální silou. Z důvodu možného naklonění o 90° (opce b) dojde k přeměně síly na radiální. Zatížení ložiska může být tedy kombinované.

Ložisko ponese pouze hmotnost otočné desky s hmotností zkušebního vzorku.



Obr. 36) Axiální i radiální působení síly na ložisko

$$a = \frac{F_{ac}}{C_{oc}} \quad (71)$$

$$a = \frac{0,005}{0,036}$$

$$a = 0,022$$

$$a = 0,022 \rightarrow 0,028 \rightarrow 0,22 = e$$

$$e_c \geq 0,22 \rightarrow Y_{oc} = 0,5; X_{oc} = 0,6 \quad (72)$$

$$Y_{oc} = 0,5$$

$$X_{oc} = 0,6$$

$$m_c = 0,5kg$$

$$F_{ac} = 5N = 0,005kN$$

$$F_{rc} = 5N = 0,005kN$$

$$P_{oc} = X_{oc} \cdot F_{rc} + Y_{oc} \cdot F_{ac} \quad (73)$$

$$P_{oc} = 0,0055kN$$

$$C_{oc} = 0,224kN$$

$$S_{oc} = \frac{0,224}{0,0055} \quad (74)$$

$$S_{oc} = 40 > 3$$

Vyhovuje podmínce ve využití v klidných podmínkách bez vibrací a zahřívání. Ložisko je voleno z hlediska rozměrových předností. Nemožnost použití menšího rozměru vnitřního průměru ložiska.

Ložisko od firmy SKF typu 618/6

$$B_c = 3,5 \text{ mm}$$

$$D_c = 13 \text{ mm}$$

$$D_c = 6 \text{ mm}$$

$$C_{oc} = 0,224 \text{ kN}$$

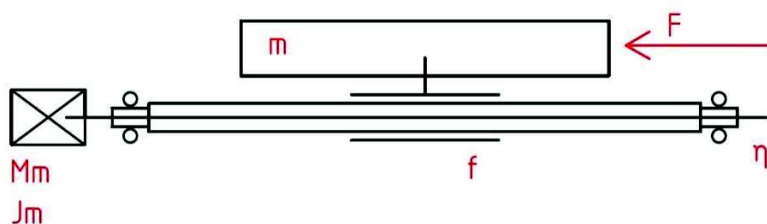
kde:

$P_o$	[kN]	ekvivalentní statické zatížení
$X_o$	[-]	součinitel radiálního zatížení
$Y_o$	[-]	součinitel radiálního zatížení
$F_r$	[kN]	složka radiálního zatížení
$F_a$	[kN]	složka axiálního zatížení

$C_o$	[kN]	statická únosnost ložiska
$S_o$	[-]	součinitel statické bezpečnosti
$m_c$	[kg]	celková hmotnost konstrukce
$B$	[mm]	šířka ložiska
$D$	[mm]	vnější průměr ložiska
$d$	[mm]	vnitřní průměr ložiska
$e$	[-]	koeficient volby velikosti $X_0$ a $Y_0$
$a$	[-]	Výpočetní koeficient pro volbu $e$

## 6.5 Motory pro osu x, y a z + pohybový šroub

Schéma ?? znázorňuje potřebné veličiny, které budou potřebné k výpočtu. Motor bude umístěn bez převodových poměrů, tedy připojen přímo na pohybový šroub. Motor musí překonat požadovanou axiální sílu, vlastní moment setrvačnosti a tření (matice, ložiska).



Obr. 37) Výpočtový model pohybového šroubu s maticí

$M_m$	[Nm]	moment motoru
$J_m$	[Nm]	moment setrvačnosti motoru
$F$	[N]	zatěžující síla
$\eta$	[%]	účinnost pohybového šroubu
$f$	[Nm]	statický třecí moment matice
$m$	[kg]	hmotnost předmětu

Volba motoru spočívá v potřebném kroutícím momentu. Kroutící moment byl vypočítán ze vztahu pro výpočet  $M_k$ . Potřebné hodnoty byly určeny dle tabulky. Důležitým prvkem pro výpočet byla volba matice pro pohybový šroub a pak samotný pohybový šroub. Každá matice má svou maximální únosnost pro daný průměr pohybového šroubu.

Nejprve vycházíme z hodnoty zatěžující síly, ze které určíme matici pohybového šroubu tak aby byla schopna snést takové zatížení. Daná matice je vyráběna pro určitý průměr pohybového šroubu. Z tabulky (pod výpočtem dané osy) pro pohybové šrouby o daném průměru, bude určena odpovídající účinnost šroubu a stoupání závitu. Poté tyto hodnoty

spočítány dle výpočtu (76), ze kterého následně zjistíme minimální kroutící moment pro motor osy.

$$M_k = \frac{F \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (75)$$

### 6.5.1 Výpočet motoru pro osu y:

Volba matice NTB

$$\omega_y = 2,3 \text{ kg}$$

$$f_{my} = 0,001 \text{ Nm}$$

$$\phi_{sy} = 3,97 \text{ mm}$$

$$F_y = 10 \text{ N}$$

$$P_y = 6,35$$

$$\eta_y = 0,83$$

$$M_{ky} = \frac{10,6,35}{2000 \cdot \pi \cdot 0,83} \quad (76)$$

$$M_{ky} = 0,0122 \text{ Nm}$$

K minimálnímu krouticímu momentu musíme přičíst ještě statický moment setrvačnosti motoru, proto pro motor osy y:  $M_{ky} + M_{sy} = 0,0122 + 0,009 = 0,0212 \text{ Nm}$

Volba krokového elektromotoru NEMA11; model 211-13-02 od firmy Servo-drive s kroutícím momentem 0,06 Nm.

Tab 4) Parametry vybraného pohybového šroubu pro osu y [37]

Průměr	Kód průměru	Stoupání závitu	Kód stoupání	také levý závit	Vnější průměr	Střední průměr	Účinnost
mm	-	mm	-	-	mm	mm	%
3,97	016	0.84	0033	možný i levý	3.96	2.95	45
3,97	016	1.27	0050	POUZE LEVÝ	3.96	2.44	59
3,97	016	2.39	0094	-	4.17	3.25	67
3,97	016	3.18	0125	-	4.27	3.30	74
3,97	016	6.35	0250	-	3.96	3.30	83
3,97	016	9.53	0375	-	3.96	3.30	85
3,97	016	12.70	0500	-	3.96	3.30	86



Tab 5) Parametry vybraného krokového motoru pro osu y [35]

Model	Moment	Proud fází	Příruba	Délka	Odpor fáze	Indukčnost fáze	Moment setrvačnosti	Hmotnost	Počet vývodů	Datasheet
-	Nm	A	mm	mm	Ohm	mH	kg.cm <sup>2</sup>	kg	-	-
211-13-01	0.06	0.67	28x28	32	5.6	3.4	0.00915	0.10884	4	Datasheet
211-13-02	0.06	1.3	28x28	32	1.7	1.1	0.00915	0.10884	4	Datasheet
211-18-01	0.1	0.67	28x28	45	7.1	4.8	0.01281	0.140585	4	Datasheet
211-18-02	0.1	1.3	28x28	45	1.3	0.8	0.01281	0.140585	4	Datasheet
211-20-01	0.12	0.67	28x28	51.1	8.6	6.7	0.0183	0.19954	4	Datasheet
211-20-02	0.12	1.3	28x28	51.1	1.9	1.7	0.0183	0.19954	4	Datasheet

### 6.5.2 Výpočet motoru pro osu x

Volba matice WDG

$$\omega_x = 4,5 \text{ kg}$$

$$f_{mx} = 0,003 \text{ Nm}$$

$$\varnothing_{sx} = 4,76 \text{ mm}$$

$$F_x = 25 \text{ N}$$

$$P_x = 10,16$$

$$\eta_x = 0,84$$

$$M_{kx} = \frac{25 \cdot 10,16}{2000 \cdot \pi \cdot 0,84}$$

(77)

$$M_{kx} = 0,048 \text{ Nm}$$

K minimálnímu krouticímu momentu musíme přičíst ještě statický moment setrvačnosti motoru, proto pro motor osy y:  $M_{kx} + M_{sx} = 0,048 + 0,009 = 0,057 \text{ Nm}$

Volba krokového elektromotoru NEMA11; model 211-13-02 od firmy Servo-drive s krouticím momentem 0,06 Nm. Pokud by hrozila ztráta kroku, musel by se moment motoru zvýšit.

Tab 6) Parametry vybraného pohybového šroubu pro osu x [37]

Průměr	Kód průměru	Stoupání závitu	Kód stoupání	také levý závit	Vnější průměr	Střední průměr	Účinnost
mm	-	mm	-	-	mm	mm	%
4,76	018	0.50	0020	-	4.78	4.14	30
4,76	018	0.64	0025	-	4.78	3.81	39
4,76	018	1.00	0039	-	4.78	3.66	47
4,76	018	1.27	0050	-	4.78	3.15	58
4,76	018	2.54	0100	-	4.78	3.45	69
4,76	018	4.76	0188	-	4.78	4.24	78
4,76	018	5.08	0200	-	4.78	3.15	82
4,76	018	9.53	0375	-	4.78	4.09	84
4,76	018	10.16	0400	-	4.78	3.15	84
4,76	018	10.85	0427	-	4.78	4.11	85
4,76	018	12.70	0500	možný i levý	4.78	3.61	86

Tab 7) Parametry vybraného krokového motoru pro osu x [35]

Model	Moment	Proud fází	Přiruba	Délka	Odpor fáze	Indukčnost fáze	Moment setrvačnosti	Hmotnost	Počet vývodů	Datasheet
-	Nm	A	mm	mm	Ohm	mH	kg.cm <sup>2</sup>	kg	-	-
211-13-01	0.06	0.67	28x28	32	5.6	3.4	0.00915	0.10884	4	Datasheet
211-13-02	0.06	1.3	28x28	32	1.7	1.1	0.00915	0.10884	4	Datasheet
211-18-01	0.1	0.67	28x28	45	7.1	4.8	0.01281	0.140585	4	Datasheet
211-18-02	0.1	1.3	28x28	45	1.3	0.8	0.01281	0.140585	4	Datasheet
211-20-01	0.12	0.67	28x28	51.1	8.6	6.7	0.0183	0.19954	4	Datasheet
211-20-02	0.12	1.3	28x28	51.1	1.9	1.7	0.0183	0.19954	4	Datasheet

### 6.5.3 Výpočet motoru pro osu z:

Volba matice ZBA

$$\omega_z = 5 \text{ kg}$$

$$f_{mz} = 0,01 \text{ Nm}$$

$$\phi_{sz} = 7,94 \text{ mm}$$

$$F_z = 45 \text{ N}$$

$$P_z = 12,70$$

$$\eta_z = 0,83$$

$$M_{kz} = \frac{45 \cdot 12,70}{2000 \cdot \pi \cdot 0,83} \quad (78)$$

$$M_{kz} = 0,11 \text{ Nm}$$

K minimálnímu krouticímu momentu musíme přičíst ještě statický moment setrvačnosti motoru, proto pro motor osy y:  $M_{kz} + M_{sz} = 0,11 + 0,03 = 0,14 \text{ Nm}$ )

Volba krokového elektromotoru NEMA17; model 4118S-04S od firmy Servo-drive s krouticím momentem 0,32 Nm.

Tab 8) Parametry vybraného pohybového šroubu pro osu z [37]

Průměr	Kód průměru	Stoupání závitu	Kód stoupání	také levý závít	Vnější průměr	Střední průměr	Účinnost
mm	-	mm	-	-	mm	mm	%
7,94	031	1.44	0057	-	8.00	6.71	43
7,94	031	1.88	0074	-	7.92	5.36	51
7,94	031	2.82	0111	-	7.92	5.89	60
7,94	031	4.24	0167	-	7.92	5.36	69
7,94	031	6.35	0250	-	7.92	5.94	76
7,94	031	12.70	0500	možný i levý	7.92	5.89	83
7,94	031	20.32	0800	-	7.77	6.17	86

Tab 9) Parametry vybraného krokového motoru pro osu z [35]

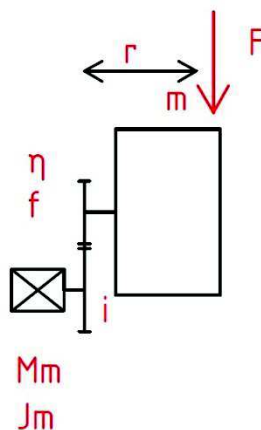
Model	Moment	Proud fází	Príruba	Délka	Odpor faze	Indukčnost faze	Moment setrvačnosti	Hmotnost	Počet vývodů	Datasheet
-	Nm	A	mm	mm	Ohm	mH	kg.cm <sup>2</sup>	kg	-	-
4118S-02	0.32	1.3	42x42	34	2.8	3.6	0.03294	0.1814	4	Datasheet
4118S-04S	0.32	0.67	42x42	34	9.9	12.5	0.03294	0.1814	4	Datasheet
4118S-04P	0.32	1.34	42x42	34	2.5	3.1	0.03294	0.1814	4	Datasheet
4118S-09	0.32	0.9	42x42	34	5.3	6.7	0.03294	0.1814	4	Datasheet
4118M-01	0.44	1.7	42x42	40.1	1.5	3	0.05124	0.2721	4	Datasheet

kde:

$M_k$	[Nm]	krouťící moment
$F$	[N]	zatěžující síla
$P$	[mm]	stoupání závitu
$\eta$	[%]	účinnost pohybového šroubu
$\phi_s$	[mm]	průměr pohybového šroubu
$\omega$	[kg]	únosnost matice
$f_m$	[Nm]	statický třecí moment matice
$M_s$	[Nm]	moment setrvačnosti

## 6.6 Motor opce b 90°

Průměr šnekového soukolí vychází z velikosti ložiska



Obr. 38) Výpočtový model šnekového soukolí

$$r_b = 0,15m$$

$$d_p = 10mm = 0,01m$$

$$\eta_b = 60\% = 0,6$$

$$F_b = 60N$$

$$i = 70$$

$$M_{kb} = \frac{F_b \cdot r_b \cdot d_p}{2 \cdot \eta_b \cdot i} \quad (79)$$

$$M_{kb} = \frac{60 \cdot 0,15 \cdot 0,01}{2 \cdot 0,6 \cdot 70}$$

$$M_{kb} = 0,001Nm$$

K minimálnímu krouticímu momentu musíme přičíst ještě statický moment setrvačnosti motoru, proto pro motor osy y:  $M_{kb} + M_{sb} = 0,001 + 0,009 = 0,01$ )

Volba krokového elektromotoru NEMA11; model 211-13-02 od firmy Servo-drive s krouticím momentem 0,06 Nm.

Tab 10) Parametry vybraného krokového motoru pro opci b [35]

Model	Moment	Proud fází	Přiruba	Délka	Odpor fáze	Indukčnost fáze	Moment setrvačnosti	Hmotnost	Počet vývodů	Datasheet
-	Nm	A	mm	mm	Ohm	mH	kg.cm <sup>2</sup>	kg	-	-
211-13-01	0.06	0.67	28x28	32	5.6	3.4	0.00915	0.10884	4	Datasheet
211-13-02	0.06	1.3	28x28	32	1.7	1.1	0.00915	0.10884	4	Datasheet
211-18-01	0.1	0.67	28x28	45	7.1	4.8	0.01281	0.140585	4	Datasheet
211-18-02	0.1	1.3	28x28	45	1.3	0.8	0.01281	0.140585	4	Datasheet
211-20-01	0.12	0.67	28x28	51.1	8.6	6.7	0.0183	0.19954	4	Datasheet
211-20-02	0.12	1.3	28x28	51.1	1.9	1.7	0.0183	0.19954	4	Datasheet

kde:

$F_b$	[N]	hmotnostní zatížení
$r_b$	[m]	rameno síly
$M_{kb}$	[Nm]	výstupní krouticí moment
$i$	[-]	převodový poměr
$P$	[mm]	stoupání závitu
$\eta$	[%]	účinnost šnekového soukolí
$f$	[-]	tření mezi kolem a šnekem soukolí
$M_{sb}$	[Nm]	moment setrvačnosti motoru

## 6.7 Motor opce c 360°

Výpočet potřebného momentu motoru vychází z maximální hmotnosti vzorku a otočné desky. Otočná deska se vzorkem bude umístěna na kuličkovém ložisku pro možné otáčení. Piezo motor proto pomocí hřídele pouze zastává otáčivý pohyb. Motor tedy musí překonat moment setrvačnosti.

$$m_c = 0,5\text{kg}$$

$$r_c = 0,05\text{m}$$

$$J_c = \frac{1}{2} \cdot m_c \cdot r_c^2 \quad (80)$$

$$J_c = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 0,05^2$$

$$J_c = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$M_{dc} = J_c \cdot \varepsilon_c \quad (81)$$

$$M_{dc} = 6,25 \cdot 10^{-4} \cdot 1,7453$$

$$M_{dc} = 0,0011 \text{Nm} = 1,1 \text{mNm}$$

K minimálnímu krouticímu momentu musíme přičíst ještě statický moment setrvačnosti motoru, proto pro motor osy y:  $M_{dc} + M_{sc} = 0,0011 + 0,0003 = 0,0014 \text{Nm}$

Volba piezo motoru LR 50 od firmy PiezoMotor s krouticím momentem 5 mNm. Vzhledem možného ustavení vzorku mimo osu těžiště.

kde:

$m_c$	[kg]	hmotnost otočné desky se vzorkem
$r_c$	[m]	poloměr otočné desky (max. velikost vzorku)
$J$	[kg.m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti břemene
$M_d$	[Nm]	potřebný moment síly
$M_{sc}$	[Nm]	setrvačný moment motoru



## 7 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

V následujícím textu uvedu možné nedostatky a rozvedu je pro možnou diskuzi. Po zpracování DP na téma návrh konstrukce precizního manipulátoru, který bude využíván jako stolek elektronového mikroskopu, vyvstala řada otázek ve volbě motoru, velikosti konstrukce nebo vhodných komponentů

Hlavní otázkou je volba pohonu. Jak již bylo řečeno v rešeršní části, krokový motor obsahuje magnety a také vyzařuje poměrně značné teplo a vibrace. Ve většině případů byl krokový motor upřednostněn jako generátor krouticího momentu před piezo motorem. Hrál zde jak finanční stránka věci, tak otázka trhu. Piezo motory dostupné na trhu se pohybují pouze do krouticího momentu 50 mNm čili nevhodné pro mé konstrukční řešení. Speciální piezo motory na objednávku nejen zvyšují tento moment, ale i cenu. Otázkou je, zda by byly dostatečné pro tento návrh. Pro představu piezomotor s  $M_k = 50 \text{ mNm}$  (přes 1.000 €), krokový motor s podobným krouticím momentem (15 €). K posouzení je vhodné uvést také vykonávaný lineární posuv pohybového šroubu. Jestliže krokový motor posouvá v jednom kroku matici o  $31,7 \mu\text{m}$ , piezo motor by umožnil posuv o pouhých 50nm. Piezo motor tedy bezmála o tři řády snižuje minimální posuv. U krokových motorů je však časté využití tzv. drobení kroku (mikrokrokování), kdy je jeden krok více rozdělen (až 256x). Ovšem více namáhá motor a zahřívá okolí. Také se rapidně snižuje velikost točivého momentu motoru.

Dále také umístění piezo motoru zabraňuje redukci materiálu a rozměrů stolu. Pokud by byl motor umístěn například v poloze pod vedením jako motor pro osu x, zmenšil by se rozměr pojezdu a tím i celé konstrukce. Při změně polohy však musíme počítat se ztrátou účinnosti a využití dalších mezi členů pro převod momentu.

Dalším předmětem diskuze je volba keramického vedení. Keramika je obecně velmi křehká a pokud by nastala výrazná dilatace plochy se kterým je vedení spojeno šrouby. Mohly by nastat nevratné deformace. Pro určení vhodného materiálu je zapotřebí zhodnotit v jakém teplotním rozmezí a jak dlouho se zde stolek bude pohybovat. Elektronový mikroskop dbá na stálost teploty uvnitř i vně vakuové komory.

Tvar konstrukce byl navrhnout pro co možná nejvyšší pevnost a tuhost. Konstrukce by mohla mít více vybrání, které by snížili hmotnost, ale také by rozptýlili vibrace.

Pro umístění motorů z důvodů vzniku vibrací a generaci tepla byly využity držáky motoru, které byly spojeny se základní konstrukcí stolu pouze minimálním stykem. Parametr minimalizace konstrukce zde nebyl vyslyšen, avšak na druhou stranu výrazně zamezí již zmíněným vibracím a přenosu tepla. Pro pohon osy x byl motor uchycen přímo pod konstrukcí. Zde byl parametr minimalizace naopak upřednostněn, za cenu vyšších vibrací a přenosu tepla.

Mikroskop měří atomy, tedy prvky o velikosti nanometrů. Abychom mohli proud elektronů usměrnit, musíme být schopni ustavit vzorek na vhodné místo. Výše zmíněný krok posuvu by se dal snížit za použití menšího stoupání v závitech. To by však znamenalo ztrátu účinnosti šroubu a matice.



## 8 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout konstrukci precizního manipulátoru využívaného jako stolek elektronového mikroskopu. Myšlenkou bylo shrnout všechny dostupné informace o dané problematice a navrhnout konstrukci.

Prvotním úkolem diplomové práce bylo seznámení se s prostředím elektronových mikroskopů. Elektronové mikroskopy zkoumají viry nebo atomy (rozlišení i pod 0,5nm). K takové rozlišovací schopnosti musí být preparát umístěn na kvalitní a přesný manipulátor. K vytvoření návrhu konstrukce precizního manipulátoru byla zapotřebí důkladná analýza a rozbor problematiky.

Po zasvěcení do problematiky elektronových mikroskopů Bylo zapotřebí navrhnout několik variant možností pojezdů dle parametrů. Po vybrání nejvhodnější varianty následovala jeho korekce. Protože je manipulátor umístěn ve vakuové komoře a měřícím prvkem je svazek elektronů, použité komponenty ať už pohybové nebo pohonné, musí být slučitelné s těmito podmínkami. Jako jsou například nemagnetičnost, minimální otěr, minimální generace tepla, kouře a vibrací, použití ve vakuu a jiné.

Po zvolení vhodných komponent bylo zapotřebí seskládání konstrukčního modelu. K tomu byl zvolen program pro tvorbu 3D modelů Autodesk Inventor. Vakuová komora má omezenou velikost. Tudíž konstrukce stolku musí být co nejmenší. Zde vyvstává další problém s volbou jednotlivých součástí konstrukce. Pro vytvoření modelu bylo zapotřebí mnoha oprav, co se týče tvaru konstrukce, ale také výběru komponent.

Navržená konstrukce manipulátoru pro elektronový mikroskop splňuje všechny kritéria pro práci ve vakuové komoře. Její rozměry jsou 350x212x210mm. Pracovní rozsah pohybu vzorku 105x103x40mm + opce b 90° a opce c 360°. Hmotnost celé konstrukce včetně maximální hmotností vzorku bude 6kg. Motory i pohybový šroub s maticí splňují pomalý a plynulý chod. Úhel krokových motoru je 1,8° na krok (na celou otáčku 200 kroků). Úhel piezo motoru umístěného pod otočnou deskou je 0,004° na krok, což je 90 000 kroků na celou otáčku. Posuvy jednotlivých os: osa x 31,7μm, osa y 50,8μm, osa z 63,5μm. Hodnoty kroku jsou uvedeny bez použití mikrokrokování, které by snížilo řádově posuv, ale také snížilo velikost točivého momentu.

Návrh precizního manipulátoru splňuje zadané parametry a je vhodný k použití ve vakuové komoře elektronového mikroskopu.



## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ANDREAS, Petr. *Elektronový mikroskop* [online]. 2015 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.lf2.cuni.cz/fakulta/clanky/zpravy-a-oznameni/motolsti-patologove-maji-novy-elektronovy-mikroskop>
- [2] Elektronová mikroskopie. Učební texty FEI VUT v Brně [online]. , 1 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://jointlab.upol.cz/~soubusta/OSYS/El\\_mikr/El\\_mikr.html](http://jointlab.upol.cz/~soubusta/OSYS/El_mikr/El_mikr.html)
- [3] Elektronová mikroskopie. *Old.vscht.cz* [online]. , 94 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/nmr/mol\\_model\\_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf](http://old.vscht.cz/nmr/mol_model_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf)
- [4] KRÁLOVÁ, Magda. ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP. *Encyklopedie* [online]. , 1 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/kvanta/elektronovy-mikroskop>
- [5] Electron Microscopy Lab. *High Pressure Group* [online]. 2018, , 1 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.highpressure.ethz.ch/facilities/analytical/electron-microscopy-lab.html>
- [6] *Informace o vakuu* [online]. , 1 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.activair.cz/cz/technicke-informace/informace-o-vakuu>
- [7] WAGNER, Vladimír. Vakuum ve skutečnosti prázdnota není. *Popclan* [online]. , 1 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/vakuum/vakuum.html>
- [8] Elektromagnetismus. *Goudsmitmagnets* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.goudsmitmagnets.com/cz/wiki/216/elektromagnetismus>
- [9] *Teatechnik.cz* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz/vysuvne-kluznym-ulozenim-g/>
- [10] *Souřadnicový systém: Strojírenství* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1293>
- [11] Teplotní roztažnost pevných látek. *Realisticky.cz: Molekulová fyzika-termika-teplotní roztažnost*. **2008**, 4.
- [12] Přenos tepla: Jaký je rozdíl mezi přenosem tepla vedením, prouděním a sáláním?. *E-konstruktor* [online]. 2015 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mez-prenosem-tepla-vedenim-proudenim-a-salanim>
- [13] Tepelná vodivost. *Pctuning* [online]. , 1 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://pctuning.tyden.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=7688&catid=35&Itemid=71](https://pctuning.tyden.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=7688&catid=35&Itemid=71)
- [14] CHUDÝ, Martin. *Způsoby snižování mechanického chvění* [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/22444/chud%C3%BD\\_2012\\_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/22444/chud%C3%BD_2012_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Martin Vašina, Ph. D.
- [15] MAKOVÍČKA, Daniel. Snižování přenosu vibrací. *Statika a dynamika konstrukcí* [online]. 2006 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/3182-snizovani-prenosu-vibraci-od-povrchove-a-podpovrchove-dopravy-zakladovym-prostredim-do-budov>

- [16] Rozdělení materiálů podle magnetických vlastností. *Elektross* [online]., 1 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://elektross.gjn.cz/magn\\_pole/magn\\_materialy.html](http://elektross.gjn.cz/magn_pole/magn_materialy.html)
- [17] Magnetické vlastnosti látek. *Elektrina a magnetismus* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z:
- [18] Přítlačný šroub bez hlavy, plná kulička. *Www.halder.com* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.halder.com/cz/Produkty/Normovane-dily/Strojni-a-zajistovaci-prvky/Pritlacne-srouby-s-kulickou/Pritlacny-sroub-bez-hlavy-plna-kulicka>
- [19] Extended XM and GM chambers. *Www.tescan.com* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/en-us/technology/accessories/extended-xm-gm-chambers>
- [20] Prizmatické vedení. *4ISP* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/hlh-voziky-uzke3/uzky-vozik-linearniho-vedeni-25mm>
- [21] Lineární vedení [online]. MN SYSTEMS [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.mnsystems.cz/precizni-vedeni/linearni-vedeni-a-stoly/line%C3%A1rn%C3%AD-veden%C3%AD-komponenty>
- [22] Rotační ložisko [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://www.mitcalc.cz/doc/help/cz/c\\_bearing\\_choice.htm](http://www.mitcalc.cz/doc/help/cz/c_bearing_choice.htm)
- [23] Elektrický pohon s jezdcem: robotika [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.rem-technik.cz/robotika/elektricke-pohony/elektricke-pohony-s-jezdcem/elektricke-osy-s-jezdcem-rcp2-rcp3-rcp4-962.html>
- [24] Electric actuator. *SMC.eu* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.smc.eu/portal\\_ssl/WebContent/digital\\_catalog\\_2/jsp/view\\_product\\_configurator.jsp?dc\\_product\\_id=133857](https://www.smc.eu/portal_ssl/WebContent/digital_catalog_2/jsp/view_product_configurator.jsp?dc_product_id=133857)
- [25] ŠIMON, Josef. BLDC motory. *Elektro* [online]. **2011** [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>
- [26] PETAN. Krokový motor. *Mylms: Elektronika* [online]. **2012** [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/text-krokovy-motor-princip/>
- [27] Krokový motor. *Pohonnatechnika* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [28] Piezoelektrický motor. *Pohonnatechnika* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/piezoelektricky-motor>
- [29] PLASS, Petr. *PIEZOLEGS MOTOR V LÉKAŘSKÉ ALPIKACI*. Brno, 2009. Bakalářská práce. VUT FEKT.
- [30] KRÁLOVÁ, Magda. PYROELEKTRICKÝ A PIEZOELEKTRICKÝ JEV. *Techmania science center* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektrostatika/pyroelektricky-piezoelektricky-jev>
- [31] RYDLO, Pavel a Aleš RICHTER. Piezoelektrické motory. *AUTOMA* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [http://automa.cz/cz/casopis-clanky/piezoelektricke-motory-2000\\_09\\_27873\\_649/](http://automa.cz/cz/casopis-clanky/piezoelektricke-motory-2000_09_27873_649/)
- [32] Trapézové šrouby a matice. *Fisatech* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.fisatech.cz/trapezove-srouby-matice/>
- [33] Keramická lineární ložiska. *MN SYSTEMS* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.mnsystems.cz/component/virtuemart/keramick%C3%A9-detail>

- [34] *Určení ložiska* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.dolezal-pe.cz/data/cf0/000010\\_000005.pdf](https://www.dolezal-pe.cz/data/cf0/000010_000005.pdf)
- [35] *Krokové motory do vakua. Servo-drive* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.servo-drive.cz/krokov\\_e\\_motory\\_do\\_vakua.php](https://www.servo-drive.cz/krokov_e_motory_do_vakua.php)
- [36] *Piezoelektrický motor. Piezomotor* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.piezomotor.com/products/rotary-piezo-motor/>
- [37] *Pohybové trapézové šrouby. Servo-drive* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.servo-drive.cz/pohybove\\_trap\\_ezove\\_srouby.php](https://www.servo-drive.cz/pohybove_trap_ezove_srouby.php)
- [38] *Koncový spínač mechanický. Conrad* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/koncovy-spinac-panasonic-am1301f-250-v-ac-10-a-rovna-kovova-paka-bez-aretace-ip40-1-ks.k1493521>
- [39] *Ozubené řemeny. Pikron* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [https://www.pikron.cz/obrazky/pdf/16001\\_PIKRON%20-%20ozubene%20remeny.pdf](https://www.pikron.cz/obrazky/pdf/16001_PIKRON%20-%20ozubene%20remeny.pdf)
- [40] HORÁK, Karel. *Optická měření. Elektrorevue* [online]. **2005** [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [41] *Druhy a výroba šneků a šnekových kol: Technologie výroby ozubených kol. Http://mlgeardesigns.blog.cz* [online]. 2013 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1310/druhy-a-vyroba-sneku-a-snekovych-kol>



## 10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

### 10.1 Seznam tabulek

TAB 1)	HODNOTY TEPELNÉ VODIVOSTI VYBRANÝCH MATERIÁLŮ [13]	21
TAB 2)	PŘEHLED DRUHŮ VAKUA [6] .....	23
TAB 3)	PARAMETRY ZVOLENÝCH LINEÁRNÍCH LOŽISEK [33] .....	50
TAB 4)	PARAMETRY VYBRANÉHO POHYBOVÉHO ŠROUBU PRO OSU Y [37]	56
TAB 5)	PARAMETRY VYBRANÉHO KROKOVÉHO MOTORU PRO OSU Y [35]	57
TAB 6)	PARAMETRY VYBRANÉHO POHYBOVÉHO ŠROUBU PRO OSU X [37]	57
TAB 7)	PARAMETRY VYBRANÉHO KROKOVÉHO MOTORU PRO OSU X [35]	58
TAB 8)	PARAMETRY VYBRANÉHO POHYBOVÉHO ŠROUBU PRO OSU Z [37]	58
TAB 9)	PARAMETRY VYBRANÉHO KROKOVÉHO MOTORU PRO OSU Z [35]	59
TAB 10)	PARAMETRY VYBRANÉHO KROKOVÉHO MOTORU PRO OPCÍ B [35]	60

### 10.2 Seznam obrázků

OBR. 1)	DETAIL ZVĚTŠENÍ MATERIÁLU [1] .....	15
OBR. 2)	PRINCIP FUNKCE TEM A SEM [3] .....	17
OBR. 3)	STOLEK ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU [5] .....	18
OBR. 4)	INDUKCE TVOŘENÁ PROCHÁZEJÍCÍMI ELEKTRONY [8] .....	19
OBR. 5)	MEZIČLEN, KLOUBOVÁ HŘÍDEL [9] .....	20
OBR. 6)	SCHÉMA SOUŘADNÉHO SYSTÉMU [10] .....	20
OBR. 7)	MANIPULÁTOR S TRYSKOU ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU [19]	25
OBR. 8)	KONSTRUKČNÍ VARIANTA A .....	26
OBR. 9)	KONSTRUKČNÍ VARIANTA B .....	27
OBR. 10)	KONSTRUKČNÍ VARIANTA C .....	28
OBR. 11)	PRIZMATICKÉ VEDENÍ [20] .....	30
OBR. 12)	VALIVÁ LOŽISKA LINEÁRNÍ [21] .....	31
OBR. 13)	ROTAČNÍ LOŽISKA [22] .....	31

OBR. 14) ELEKTRICKÝ POHON S JEZDCEM [23] .....	32
OBR. 15) PRINIP PIEZOELEKTRICKÉHO MOTORU [30] .....	33
OBR. 16) POHYBOVÝ ŠROUB S MATICÍ [32] .....	34
OBR. 17) KERAMICKÁ LINEÁRNÍ LOŽISKA [33] .....	36
OBR. 18) PROVEDENÍ LOŽISKA NUP [34] .....	37
OBR. 19) MODEL MOŽNÝCH SIL PŮSOBÍCÍCH NA LOŽISKA .....	38
OBR. 20) KROKOVÉ MOTORY OD FIRMY SERVO-DRIVER [35] .....	39
OBR. 21) PIEZOELEKTRICKÝ MOTOR OD FIRMY PIEZOMOTOR [36] .....	40
OBR. 22) POHYBOVÝ ŠROUB OD FIRMY SERVO-DRIVE [37] .....	41
OBR. 23) ŠNEKOVÉ SOUKOLÍ [18] .....	41
OBR. 24) MECHANICKÝ KONCOVÝ SPÍNAČ OD FIRMY PANASONIC [38] .....	42
OBR. 25) BEZHĽAVÉ ŠROUBY [41] .....	42
OBR. 26) ODSŤÍNĚNÍ MOTORU .....	43
OBR. 27) UMÍSTĚNÍ MOTORU POD STOLEM .....	43
OBR. 28) OZUBENÝ ŘEMEN OD FIRMY PIKRON BELT DRIVES [39] .....	44
OBR. 29) TVAROVÁNÍ SOUČÁSTI .....	44
OBR. 30) SCHÉMA OPTICKÉ INTERFEROMETRIE [40] .....	45
OBR. 31) KONSTRUKCE 1 .....	46
OBR. 32) KONSTRUKCE 2 .....	47
OBR. 33) SCHÉMA ROZMĚRŮ LINEÁRNÍHO LOŽISKA [33] .....	50
OBR. 34) RADIÁLNÍ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA LOŽISKO .....	50
OBR. 35) AXIÁLNÍ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA LOŽISKO .....	52
OBR. 36) AXIÁLNÍ I RADIÁLNÍ PŮSOBNÉ SÍLY NA LOŽISKO .....	53
OBR. 37) VÝPOČTOVÝ MODEL POHYBOVÉHO ŠROUBU S MATICÍ .....	55
$F$ [N] ZATĚŽUJÍCÍ SÍLA .....	55
$\eta$ [%] ÚČINNOST POHYBOVÉHO ŠROUBU .....	55
$f$ [NM] STATICKÝ TŘECÍ MOMENT MATICE .....	55
OBR. 38) VÝPOČTOVÝ MODEL ŠNEKOVÉHO SOUKOLÍ .....	59

### 10.3 Seznam symbolů

$k$	[m/mK]	koeficient lineární teplotní roztažnosti duralu
$l_0$	[mm]	počáteční měřená délka
$\Delta t$	[°C]	rozdíl teploty
$\Delta l$	[m]	prodloužení délky
$m$	[kg]	hmotnost dané soustavy

$F$	[N]	zatěžující síla
$l$	[mm]	délka vedení stolu
$p$	[Ncm]	maximální zatížení válečku pro daný průměr
$n$	[Ncm]	maximální zatížení délky vedení
$P_o$	[kN]	ekvivalentní statické zatížení
$X_o$	[-]	součinitel radiálního zatížení
$Y_o$	[-]	součinitel radiálního zatížení
$F_r$	[kN]	složka radiálního zatížení
$F_a$	[kN]	složka axiálního zatížení
$C_o$	[kN]	statická únosnost ložiska
$S_o$	[-]	součinitel statické bezpečnosti
$m_c$	[kg]	celková hmotnost konstrukce
$B$	[mm]	šířka ložiska
$D$	[mm]	vnější průměr ložiska
$d$	[mm]	vnitřní průměr ložiska
$e$	[-]	koeficient volby velikosti $X_0$ a $Y_0$
$a$	[-]	Výpočetní koeficient pro volbu $e$
$M_k$	[Nm]	kroutící moment
$F$	[N]	zatěžující síla
$P$	[mm]	stoupání závitu
$\eta$	[%]	účinnost
$\emptyset_s$	[mm]	průměr pohybového šroubu
$\omega$	[kg]	únosnost matice
$f_m$	[Nm]	statický třecí moment matice
$F_b$	[N]	hmotnostní zatížení
$r_b$	[m]	rameno síly
$i$	[-]	převodový poměr
$m_c$	[kg]	hmotnost otočné desky se vzorkem
$r_c$	[m]	poloměr otočné desky (max. velikost vzorku)
$J$	[kg.m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti
$M_d$	[Nm]	moment síly
$r_b$	[m]	rameno síly
$M_{kb}$	[Nm]	výstupní kroutící moment
$i$	[-]	převodový poměr
$f$	[-]	tření mezi kolem a šnekem soukolí
$M_s$	[Nm]	moment setrvačnosti motoru

$J$	$[\text{kg.m}^2]$	moment setrvačnosti břemene
-----	-------------------	-----------------------------



## 11 SEZNAM PŘÍLOH

### 11.1 Výkresová dokumentace

Sestava precizního manipulátoru - S1-162131

Výrobní výkres stolku osy y – P1-162131

Výrobní výkres stolku osy x – P2-162131

Výrobní výkres stolku osy z – P3-162131

Výrobní výkres stolku opce c – P4-162131

Výrobní výkres ložiskového krytu – P5-162131

### 11.2 CD